

旱地农业
高效节水与灌溉技术

马耀光　张保军　主编
翟惠平　丁瑞霞　李援农　副主编





化学工业出版社

旱地农业高效节水与灌溉技术

本书详细讲解了：

工程节水措施

农艺节水措施

管理节水措施

补充灌溉节水措施



ISBN 978-7-122-13321-2



销售分类建议：农业／农业工程

定价：59.00 元

旱地农业
高效节水与灌溉技术

马耀光　张保军　主编

翟惠平　丁瑞霞　李援农　副主编


化学工业出版社

·北京·

本书系统地介绍了旱地农田水分、养分的相互作用，旱地土壤保墒技术，保护性节水覆盖栽培技术，旱地农业集雨利用工程技术，旱地农业补充节水灌溉技术，旱地农田提高土壤水分生产率的途径，作物品种资源节水途径与技术，地下水源的开发与利用等旱地农业节水技术。本着理论联系实际的原则，结合最新的理论和应用技术设计实例，对各种旱地农业节水的新理论、新方法和新技术进行了详尽的论述。

本书可供水资源利用、农业规划与管理、设施农业建设与管理、农田水利工程建设与运用等方面的科技工作者、广大的农业生产者和高等学校相关专业的师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

旱地农业高效节水与灌溉技术/马耀光，张保军主编.
北京：化学工业出版社，2012.3
ISBN 978-7-122-13321-2

Ⅰ.旱…　Ⅱ.①马…②张…　Ⅲ.旱地-农业灌溉-节约用水　Ⅳ.S275.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 015613 号

责任编辑：李　丽　　文字编辑：刘砚哲
责任校对：郑　捷　　装帧设计：关　飞

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号　邮政编码 100011）
印　　刷：北京云浩印刷有限责任公司
装　　订：三河市宇新装订厂
710mm×1000mm　1/16　印张 19　字数 383 千字　2012 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899
网　　址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定　　价：59.00 元
版权所有　违者必究

前言

中国是一个人口和农业大国，农业作为最重要的基础产业，其现代化和生产力水平相对较低，其中主要的制约因素是水资源短缺，尤其是在水资源严重不足和开发利用条件较差的中国北方地区以及更为广泛分布的雨养农业和旱作农业地区，有限降水资源的合理利用、可调蓄水资源的科学调控就成为旱地农业发展的生命线。因此，采取各种综合措施实行旱地农业高效节水技术，科学地利用有限的区域水资源，提高旱地农业区的水分生产效率，促进旱地农业、雨养农业和设施农业的健康发展，是现代旱地农业发展的必由之路。

旱地农业节水技术主要包括工程节水措施、农艺节水措施、管理节水措施和补充灌溉节水措施四个方面。前三种节水措施主要是充分利用区内降水资源、土地资源、种质资源及农业水肥管理与技术管理提高农田和作物水分生产率，后者主要是区外引水和区内集雨、蓄泉及地下水资源开发与调蓄利用的补充灌溉节水措施。工程节水措施是指通过在田间修筑各种辅助工程设施，如土地平整、坑垄、集水工程、截流或防渗工程等，减少地表径流和增加降水入渗、阻止土壤水分向超根层排泄及降水集蓄利用等节水措施；农艺节水措施是指通过各种耕作栽培方法保墒，提高作物光合效率和水分利用效率的节水措施，如覆盖、培肥、良种选配及化学农业措施等；管理节水措施指通过各种科学经济的农业和农田管理措施优化各种农业生产环节和生产要素，促进节约用水和水分生产效率的提高；补充灌溉节水措施是在区内降水资源严重不足或无法利用的旱地区进行区外调水或区内可调控的雨水、泉流及分散的小型地下水资源的开发利用作为补充水源的节水灌溉利用措施。旱地农业节水技术的应用和发展，已经和必将产生巨大的农业经济效益和生态环境效益，为农业的粮食安全和生态环境保育作出应有的贡献。

本书的规划和编写大纲的制订由化学工业出版社编辑与西北农林科技大学马耀光、张保军等共同完成。编撰工作的分工如下：第 1 章由翟丙年、李世清、李紫燕执笔；第 2 章由张保军、丁瑞霞执笔；第 3 章由张保军、丁瑞霞、马林执笔；第 4 章由娄宗科、翟惠平、陈萍、李援农、阎宁霞执笔；第 5 章由李援农、翟惠平、阎宁霞、程冬玲、马耀光执笔；第 6 章由张保军、张正茂、马林执笔；第 7 章由张保军、张正茂、王新中执笔；第 8 章由蔡明科、程冬玲、马耀光执笔。马耀光、张保军担任主编，负责全书的统编定稿工作；翟惠平、丁瑞霞、李援农担任副主编，负责编写的组织协调、文稿的组织、编辑与勘订等工作，柴洁负责全书的外文资料和文献的整编与勘订工作。

本书的出版得到了西北农林科技大学水利与建筑工程学院、农学院、资源环境学院和西北农林科技大学图书馆的大力支持，编写工作还得到了山仑院士、李佩成院士、王立祥教授、蔡焕杰教授、刘俊民教授、魏晓妹教授和马孝义教授等的关心和帮助，在此，谨致以我们崇高的敬意和诚挚的感谢。

由于我们的学识水平所限，书中的缺点和错误在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编著者

2011 年 1 月

目　录

第 1 章　旱地农田水分、养分的相互作用 …… 1
1.1　水分与养分的相互作用及机理 …… 1
1.1.1　以水调肥的效应及机理 …… 1
1.1.2　以肥调水的效应及机理 …… 3
1.2　旱地农田水肥的相互作用 …… 7
1.2.1　在低肥力土壤上水肥相互作用 …… 7
1.2.2　在中肥力土壤上水肥相互作用 …… 8
1.2.3　在高肥力土壤上水肥相互作用 …… 8
1.3　水肥相互作用模型及其应用 …… 9
参考文献 …… 15
第 2 章　旱地土壤保墒技术 …… 17
2.1　农业蓄水保墒机制 …… 17
2.1.1　农田土壤水分状态 …… 17
2.1.2　农业蓄水保墒机制 …… 18
2.2　旱地土壤的蓄水技术 …… 19
2.2.1　翻耕法 …… 20
2.2.2　深松耕 …… 21
2.2.3　水平等高耕作 …… 22
2.2.4　修建梯田 …… 22
2.2.5　等高垄沟耕种法 …… 23
2.2.6　蓄水聚肥改土耕作法 …… 24
2.2.7　川台地垄沟种植法 …… 24
2.2.8　少耕免耕技术 …… 25
2.2.9　轮作及种植结构调整技术 …… 27
2.3　旱地土壤的保水技术 …… 28
2.3.1　耙耱保墒 …… 28
2.3.2　镇压保墒及提墒 …… 29
2.3.3　中耕保墒 …… 30
2.3.4　覆盖保墒 …… 31
2.3.5　保水剂保墒 …… 37
2.3.6　抗蒸腾剂保墒 …… 39

2.3.7 土面保墒增温剂保墒（土壤结构改良剂保墒）…… 40
2.3.8 钙-赤合剂保墒 …… 42
参考文献 …… 43
第3章 保护性节水覆盖栽培技术 …… 45
3.1 覆盖栽培技术…… 45
3.2 秸秆覆盖栽培技术…… 45
3.2.1 秸秆覆盖及其方法…… 45
3.2.2 秸秆覆盖对土壤含水量的影响…… 47
3.2.3 秸秆覆盖对土壤温度的调控作用…… 48
3.2.4 秸秆覆盖对土壤湿度剖面的影响…… 48
3.2.5 秸秆覆盖对土壤的培肥作用…… 49
3.2.6 秸秆覆盖的节水增产作用…… 50
3.3 塑料薄膜覆盖技术…… 52
3.3.1 地膜覆盖栽培的原理…… 52
3.3.2 地膜覆盖栽培的生物学效应…… 56
3.3.3 地膜覆盖栽培的增产效果…… 57
3.3.4 地膜覆盖栽培的方法…… 57
3.4 砂石覆盖栽培技术…… 65
3.4.1 砂石覆盖的作用…… 65
3.4.2 砂田的种类和建设…… 66
3.5 土表化学覆盖剂…… 68
参考文献 …… 68
第4章 旱地农业集雨利用工程技术 …… 70
4.1 集雨保水工程在旱地农业中的地位…… 70
4.1.1 雨水农业利用的主要途径…… 70
4.1.2 集水保水技术在旱地农业生产中的地位和发展前景…… 71
4.2 雨水集蓄利用工程规划…… 72
4.2.1 基本资料的收集…… 73
4.2.2 需水计划…… 73
4.2.3 集流面规划…… 76
4.2.4 蓄水工程规划…… 77
4.2.5 供水用水规划设计…… 77
4.2.6 工程建设投入产出分析…… 77
4.2.7 工程实施的规划…… 77
4.3 雨水集蓄利用工程设计与施工…… 77
4.3.1 集流工程…… 77

4.3.2 截流输水工程 …… 84
4.3.3 蓄水工程 …… 85
4.3.4 水窖辅助工程 …… 100
4.4 集水工程管理 …… 100
4.4.1 水质管理 …… 100
4.4.2 工程管护 …… 103
参考文献 …… 103
第5章 旱地农业补充节水灌溉技术 …… 105
5.1 旱地农业节水的主要特点和增产机理 …… 105
5.1.1 旱作物对农田水分的基本要求 …… 105
5.1.2 旱作物生长对地面灌溉节水技术的基本要求 …… 108
5.2 地面节水灌溉技术 …… 108
5.2.1 地面灌水方法简介 …… 108
5.2.2 评估地面灌溉节水技术的主要指标 …… 109
5.2.3 畦灌技术及其改进 …… 112
5.2.4 沟灌技术 …… 121
5.2.5 涌流灌溉 …… 126
5.2.6 节水型沟灌技术 …… 128
5.2.7 果园地面灌溉 …… 128
5.2.8 地膜覆盖灌水技术 …… 132
5.3 管道输水灌溉技术 …… 136
5.3.1 管道输水灌溉系统的类型与组成 …… 137
5.3.2 系统规划与布置 …… 138
5.3.3 管网规划布置 …… 140
5.3.4 田间灌水系统布置 …… 143
5.4 喷灌技术 …… 145
5.4.1 喷灌的特点 …… 145
5.4.2 喷灌系统的组成和分类 …… 145
5.4.3 规划设计基本资料 …… 146
5.4.4 喷灌工程规划设计 …… 147
5.5 微灌技术 …… 153
5.5.1 微灌技术及特点 …… 153
5.5.2 微灌系统设计 …… 154
5.5.3 设计实例 …… 158
5.6 渠道防渗工程技术 …… 169
5.6.1 概述 …… 169

5.6.2 渠道防渗工程设计和施工的基本规定 …… 171
5.6.3 砌石防渗 …… 179
5.6.4 混凝土防渗 …… 180
5.6.5 沥青混凝土防渗 …… 186
5.6.6 膜料防渗 …… 190
参考文献 …… 202
第6章 旱地农田提高土壤水分生产率的途径 …… 204
6.1 旱地农田土壤水分动态 …… 204
6.1.1 裸地土壤水分动态 …… 204
6.1.2 非裸地土壤水分动态 …… 208
6.2 旱地农田土壤水分平衡 …… 216
6.2.1 主要农作物耗水规律 …… 216
6.2.2 影响土壤水分利用率提高的主要限制因子 …… 217
6.3 提高土壤水分生产率的途径 …… 219
6.3.1 选用抗旱节水优良品种，改善种植结构 …… 219
6.3.2 保护性耕作提高土壤储水能力 …… 219
6.3.3 覆盖保墒技术 …… 220
6.3.4 化学调控技术 …… 221
6.3.5 水肥耦合技术与水肥一体化技术 …… 222
6.3.6 节水灌溉技术 …… 222
6.4 旱地耕作改制与农林牧综合发展 …… 223
6.4.1 旱地农业区农业结构分析 …… 224
6.4.2 旱作农业区农业结构调整的基本原则和技术途径 …… 228
6.5 耐旱节水高产良种的选用及品种搭配 …… 233
6.5.1 选用与当地自然和生产条件相适应的品种 …… 233
6.5.2 注意提纯复壮当地品种 …… 233
6.5.3 制定适应的种植制度 …… 233
6.5.4 注意开发和利用水资源 …… 233
6.5.5 合理配置作物品种 …… 233
6.5.6 提高作物播种质量 …… 234
6.5.7 及时管理、适时收获 …… 234
参考文献 …… 234
第7章 作物品种资源节水途径与技术 …… 236
7.1 作物抗旱的基本机理与类型 …… 236
7.2 耐旱作物品种资源与节水栽培途径 …… 237
7.2.1 小麦 …… 237

7.2.2 谷子与糜子 …… 241
7.2.3 甘薯与马铃薯 …… 243
7.2.4 高粱 …… 247
7.2.5 荞麦 …… 249
7.2.6 大豆与杂豆 …… 253
参考文献 …… 260
第8章 地下水源的开发与利用 …… 261
8.1 地下水分类、分布与富集规律 …… 261
8.1.1 地下水的分类 …… 261
8.1.2 地下水的基本类型与富集规律 …… 261
8.1.3 地下水分布及富集规律 …… 268
8.2 地下水资源的调查与评价 …… 270
8.2.1 地下水资源的调查手段与方法 …… 270
8.2.2 地下水资源的概略评价 …… 273
8.3 地下水源的开发规划 …… 277
8.3.1 规划原则 …… 277
8.3.2 规划分区 …… 278
8.4 小型地下水源利用工程 …… 279
8.4.1 泉水的利用工程 …… 279
8.4.2 井的设计、施工 …… 280
8.4.3 地下水截流工程 …… 287
8.4.4 小型地下水库 …… 289
8.5 地下水资源保护 …… 290
8.5.1 地下水超采区治理 …… 291
8.5.2 地下水水源地保护 …… 292
8.5.3 地下水污染预防 …… 293
8.5.4 地下水人工补给 …… 294
参考文献 …… 296

第 1 章　旱地农田水分、养分的相互作用

水分和养分既是影响旱地农业生产的主要胁迫因子，也是一对联因互补、互相作用的因子。它们既有自己特殊的作用，又互相作用，影响着彼此的效果和作物产量，形成了一条水分-养分-作物产量相互作用的链条。

本章重点论述水分和养分的相互作用，阐明其相互作用的效应及机理，以便充分揭示和利用水分和养分之间的耦合效应，使其发挥最大的增产效果，从而提高旱地水分和养分的利用效率，达到高产、高效、保护环境之目的，真正做到旱地农业的可持续发展。

1.1　水分与养分的相互作用及机理

1.1.1　以水调肥的效应及机理

以水调肥的效应及机理主要表现在以下 5 个方面。

（1）增加土壤养分有效性

在影响土壤养分有效性的所有因子中，水分起着极其重要的作用。土壤水分状况通过影响土壤和肥料不同位点无效养分（包括作物残留物）向作物可利用的有效态养分的转化及其转化速率，从而影响着作物对养分的吸收和肥料效果。

Stanford 等（1974）在不同水分条件下，对土壤中有机氮矿化进行了研究。结果表明，2 周时矿化出的氮量随土壤水分成比例增长。国内一些研究者也对土壤进行长期培养试验以研究有机氮矿化与土壤水分的关系，发现这种线性相关关系不仅适用于短期试验［2 周，相关方程为 $y=-3.68+1.06x$（$r=0.99$）］，同时也适用于长期培养试验［21 周，相关方程为 $y=9.59+0.90x$（$r=0.99$）］。

Marschner（1986）认为，水分供应的变化，既能改变根系分布情况，也能改变从不同深度土壤吸收养分的情况。Grimme 等人（1981）的试验表明，生长在黄土类土壤上的春小麦，生长后期吸收的钾量平均约有 50%来自底土，而生育期降雨量不同，作物对底土养分吸收数量不同，旱年约有 60%来自于底土，湿润年则为 30%。

Vig. A. C. 发现，土壤水分状况可提高磷肥撒施的效果。在土壤较湿润情况下，小麦吸收磷更多。当小麦吸收土壤磷随灌水而增加时，吸收肥料磷随即下降。小麦吸收土壤磷与土壤水分状况呈线性关系。Qiupeng Zeng 对钾的研究发现，在壤土上种植玉米，若土壤水分干湿交替，尤其是水分缺乏状况下，会增强土壤钾素

的固定，降低土壤钾的移动性，而且抑制植物生长，从而减少了植物对钾离子的吸收。

水分不仅影响土壤有机氮的矿化，还影响着铵态氮在土壤中的硝化。李生秀等（1995a）采用氯化铵、尿素和碳酸氢铵3种氮肥进行的硝化试验表明，3种肥料第3天的平均硝化速率和含水分量之间的相关系数为0.975（$n=6$，$p<0.01$）；土壤含水量每增加1%，硝化速率增加0.625μg/(g·d)。在试验的水分范围内（12%～27%），土壤水分含量越高，硝化速率越快，铵态氮就越容易向旱地作物易于吸收的硝态氮转化。

（2）促进养分迁移

土壤中的养分只有溶解在水中才能通过流动或扩散到达根系表面而被植物吸收，养分在土壤中移动的速度和距离与土壤含水量密切相关。随着土壤含水量的降低，离子的扩散速度也会变慢。

矿质养分由土壤向根表的迁移分为两种主要形式，即质流和扩散。Ca、Mg、N等养分离子大多是通过质流迁移的；而P、K等养分离子则更多地是通过扩散迁移的。有研究表明，旱地小麦由质流和扩散供给的氮素分别占82%和7%（史瑞和，1989）。Reager等人（1981）用甜菜、春小麦和春大麦进行的试验结果表明，以质流供给作物的硝态氮所占比例最高。质流是水分驱动的物质转移，扩散是水介质中的离子行为，因而充分的水分供应，有利于养分在土壤中的迁移。

（3）提高养分吸收

土壤水分供应是否适宜，直接影响到作物的长势，决定着作物的物质合成及其生命进程，决定着作物根系的活力，从而影响到作物对养分的吸收与利用。

据研究，水分亏缺除影响养分运输外，还影响植物代谢。代谢功能紊乱，有机物质降解，光合速率下降，抑制根系生长，降低根系的吸收面积和吸收能力，木质部质流黏滞性增大，最终导致养分的吸收和运输能力下降。Makarov（1969）研究表明，在湿润年份氮肥利用率为43%～53%，而在干旱年份仅为34%左右。赵振达和张金盛（1979）的研究结果表明，当盆栽土壤水分状况在萎蔫系数（$pF=4.1$）以下时，氮肥几乎不能被小麦吸收利用，利用率仅1.93%；而当土壤湿度在pF为2.7～3.1时，利用率高达35.3%～38.7%。王小彬等（1988）研究发现，地上部和地下部干物重量和P、K的吸收量均随着土壤水分含量增加而增加。当土壤含水量为12.1%时，植株地上部干重2.2g，含磷0.13%，含钾2.6%；当含水量为20.8%时，植株地上部干物质重2.9g，磷、钾含量分别为0.21%和3.8%。当然，过高的土壤水分对作物吸收养分也有不利影响。Torbert等人（1992）发现，土壤含水量过高时，氮肥的利用率反而降低，而且还常因某些离子（如Fe^{2+}和Mn^{2+}）浓度过高，造成植物吸收过量而中毒。

水分对作物吸收养分的影响也可从伤流液中养分数量予以说明。李生秀等

（1995）对伤流液的测定表明，伤流液中的铵态氮、硝态氮和氨基酸与伤流量的变化一致，此高彼高，此低彼低，相依相存，均随土壤含水量而变化。土壤水分供应情况好时（如覆膜或灌水），均高；反之，均低。

（4）促进养分向籽实体分配

水分不仅影响着根系对养分的吸收，而且还影响其在作物体内的分布，促进养分向籽粒和果实转移和分配。

Singandhupe 等人（1990）报道，延长水分胁迫时间，会使水稻吸收的氮素分配模式发生变化，向籽粒中分配的氮素减少 16.5%。王小彬等（1993）分别给冬小麦和夏玉米灌水 70mm 和 60mm 后发现，在平均施氮量为 112.5kg/hm^2 时冬小麦和夏玉米籽粒中的氮素分别增加 0.07%和 0.03%，而茎叶中减少 0.12%和 0.14%。李世清等（1994）的试验也得到了类似结论。Campbell 与 Paw 的研究也表明，水分充足条件下，春小麦籽粒中分布的氮素提高了 7%，茎叶和根部的氮素分别减少了 4%和 5%。可见，水分能突出促进氮素向经济产物中的转运与积累，在产量提高的同时，保证了产品的养分含量维持在一定水平，使作物品质不至严重下降。

（5）提高肥料效果

水分能促使土壤养分矿化，土壤养分向根表运移，促进养分的吸收和转运，因而能显著提高肥料效果，但水分对肥料效果的影响与土壤水分状况有密切关系。水分胁迫条件下，施肥有时不但没有良好效果，反而还有危害；水分过多，有些养分会被淋失，也不利肥料作用的发挥；只有在合适的水分供应条件下，才能充分发挥营养物质的功能。

1.1.2　以肥调水的效应及机理

以肥调水的效应及机理主要反映在以下七个方面。

（1）增加土壤蓄水保水能力

培肥农田，特别是增加有机质含量，改善土壤结构，能增加土壤的蓄水保水能力。李玉山对渭北旱源不同地带小麦水分利用效率进行的分析表明，水分利用效率的高低和土壤肥力的高低分布相一致，同一地区水分生产效率之所以相差很大主要在于土壤肥力高低的不同（李玉山，1983）。Jamision（1953）发现，砂质土的保水能力与土壤有机质含量间存在高度正相关关系。张绍元等（1982）报道，每公顷施 75t 有机肥的旱地麦田，比同类瘠薄地 2m 土层中多储 44.7mm 的降水。程素云（1987）报道，施有机肥可使红油土 2m 土层中的储水量增加 30mm。马耀华等（1984）的研究表明，有机肥和化肥合理配施，能提高土壤有机碳含量，促进土壤有机无机复合胶体的形成，有助于改良土壤结构，增大土壤保水能力；增加土壤养分，改善作物营养状况，增强作物对深层土壤水分的利用，提高作物的水分生产效率。

施肥还可提高土壤水势，特别是在低含水量和作物生育中前期的土壤水势，使原来一部分对植物“无效”的水变得“有效”（赵立新等，1991）。Unger（1975）用多元回归方法证明，土壤有机质含量每增加1%，植物可利用的土壤水分（体积含水量）增加1.8%。

（2）促进根系生长发育

施肥对作物根系生长发育的影响已有许多研究。Smith（1954）指出，旱作农田施肥可较早地促进植物生长，使根系较快进入深层，从而有效地吸收休闲期储积在深层土壤中的水分。Brown（1972）发现，小麦植株对土壤水分的吸取深度，不施氮时仅局限在91cm土层以内，施用氮肥后，深度增加一倍，水分利用率显著提高。李立科等（1983）在渭北旱原进行的试验表明，磷肥可促进小麦根系发育，加强对深层土壤水分的吸收利用。不施肥、施氮、施磷时的根系深度分别为1.4m，1.45m和2.7m；不施肥和施氮者，收获前8天140～200cm土层含水量分别为17.4%和18.2%；施磷者，0～200cm土层几乎已无可被小麦吸收利用的水分。磷肥虽然可增加根系长度，但如氮素不足，根系的生长量增加并不明显（王同朝和李凤民，1998）。合适的氮、磷配合，既能促进根系延伸，也能增加根系的密度和生长量，特别有利于作物吸收利用深层土壤水分（Gregory，1988），这已为大量的试验所证明。Gregory（1988）在叙利亚北部进行的试验显示，施磷仅能增加表层土壤中的根长，而氮、磷配合施用会增加整个土壤剖面内的根系。Brown等人（1987）的试验结果也同样表明，氮、磷混施能增加整个生根深度内的根长，特别是表层和深层土壤中的根系生长量。李生秀等（1994）研究了氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果后认为，根系的发育程度对于作物的生产力，尤其对旱地作物的生产力，有着特别重大的意义。根系不仅在吸收养分中有着巨大的不可代替的作用，而且在吸收可移动的水分中也有巨大的作用。施肥促使作物根系发育，扩大作物利用土壤水分范围，是其提高作物利用土壤水分和养分的前提。杜建军等（1995）研究表明，合理施用氮肥和磷肥能促进作物根系发育，扩大作物觅取水分和养分的土壤空间，从而促进作物对土壤水分和养分的利用。赵立新等（1991）认为施肥可以改善土壤养分状况，促进根系发育，提高根系从深层吸收水分的能力。史奕和邹邦基等（1995）的研究表明，不同施肥处理使小麦根系的长度，重量和体积均有不同程度的增加，并使小麦根系活力增强，同时，也加大了小麦对土壤水分的利用，提高了水分利用效率，显示了以肥调水的效果。

（3）提高作物摄取和转运土壤水分的能力

施肥的一个主要作用是提高作物吸取、转运、利用土壤水分的能力。与不施氮相比，施氮后不但根系发达，而且具有较强的吸收和转运水分和养分的能力。这可以从作物的蒸腾强度、伤留量和叶水势说明。

蒸腾作用是作物吸收和运输水分的动力之一，它的大小反映着作物生长势的强

弱，也反映着作物吸取水分和养分能力的大小。蒸腾强度越大，作物根部吸收的水分越多，养分通过质流到达根系表面的数量也就越多，就越有利于作物对水分和养分的吸收。同时，蒸腾量增加会促进木质部水分和矿质元素向地上部转运，既增强了作物对水分的吸收，也增强了作物向上转运水分的能力。

伤流量和蒸腾量相似，既是作物生长强弱的反映，也是作物吸收转运水分和养分能力的标志。在相同的水分条件下，伤流量的大小反映了根压的大小和主动吸水过程的强弱。春玉米和冬小麦的田间测定结果表明，施氮后伤流量增加，伤流液中的硝、铵态氮和氨基酸含量也明显提高。氨基酸氮含量提高表明了根系活性增强，有利于作物吸取和运转土壤水分。

叶水势的高低既可反映土壤供水能力的大小和作物缺水的程度，也可反映叶片从其他器官中吸取水分的能力，叶水势越小，吸水力越高。叶水势降低和蒸腾强度增高有利于水分向地上部分迁移。

(4) 改善作物水分状况

据研究，氮、磷、钾营养可增加作物细胞原生质胶体水合度，提高原生质的保水能力，增加束缚水含量。李英（1991，1992）和张岁岐等（1995）在冬小麦和春小麦上的试验结果表明，正常供水条件下，春小麦叶片水势 Ψw 和相对含水量 RWC 在不同施肥处理间变化不大；中度干旱情况下，Ψw 虽无明显变化，但 RWC 在不施肥处理上则明显提高；严重干旱情况下，施肥处理的 Ψw 明显降低，而 RWC 则升高。这说明不同干旱下，施氮对春小麦水分状况有明显影响，施氮改变了春小麦受到水分胁迫的进程，严重干旱情况下，施氮具有增加叶片“水容”的作用（RWC 升高），提高了叶片的保水能力，在一定程度上提高了其耐旱性。

渗透调节是作物适应干旱逆境的一种重要的生理机制，它是通过细胞溶质的大量自动累积以降低渗透势从而维持叶片膨压和细胞体积的有效方式（王韶唐，1983）。薛青武（1990），李秧秧等人（1993）的研究表明，在 N、P、K 亏缺的土壤上单施 N、P、K 或三者配合均可提高小麦叶片的渗透调节能力。如在严重土壤水分胁迫下，高 N、中 N 和低 N 小麦叶片的渗透调节能力分别为 0.43，0.38 和 0.07MPa；在土壤含水量分别为田间持水量的 30%和 50%时，施 P 春小麦叶片的渗透调节能力分别较相应的不施 P 处理高 0.03MPa 和 0.12MPa，表现出随营养水平的提高渗透调节能力增强的趋势；K 素营养也表现出相同的作用。张岁岐，山仑等（1995）的研究也表明，不论是施肥处理还是不施肥处理，在干旱情况下，春小麦都产生了渗透调节，但施氮处理的渗透调节能力要明显大于不施氮处理，而且在同等干旱情况下，施氮越高，渗透调节能力越强，这说明干旱情况下，施氮处理由于渗透透调节作用对膨压和生长的维持要大于不施氮处理。据李秧秧等（1993）的研究，无机营养提高作物渗透调节能力的作用与土壤水分胁迫状况有关，如 N、P、K 配合时，在土壤含水量为毛管持水量 40%～70%范围内，不施肥与施肥处理

叶片的渗透调节能力基本相同，而在相对含水量为 20%～40%范围内，施肥叶片的渗透调节能力明显大于不施肥处理，且随土壤含水量的下降，渗透调节能力的差异增大。

(5) 提高作物蒸腾，减少蒸发

蒸腾作用的强弱是植物水分代谢的重要生理指标。干物质的形成，作物产量的高低都与蒸腾量和蒸腾效率有关，与蒸腾相反，蒸发却是水分的无效消耗。因此，提高作物的蒸腾量和蒸腾效率，尽量减少水分的无效损耗在旱地农业生产中更有着特别的意义。

李世清等（1995）的研究表明，施肥以后蒸腾损失的水分增加，而蒸发损失的水分减少，蒸腾与蒸散（T/ET）所消耗的水分比值明显提高。蒸发减少程度和蒸腾蒸散比值提高程度均与施氮量有明显的线性关系。原因在于施肥后，作物长势强，能较多地利用土壤水分，使蒸发损失的机会减少，同时较大的叶面荫蔽地面，又降低了土壤温度，降低了蒸发速率。不仅如此，施肥还提高了作物的蒸腾效率，从而也增强了作物的光合能力。施肥促进作物对水分的吸收、转运和利用，因而一方面作物生长健壮，茎叶增加，扩大了光合作用场地，另一方面原料充分，形成了更多的光合产物。

(6) 增强光合作用，提高光合效率

许多研究表明，施肥可以提高作物的光合作用能力，从而促进干物质的形成和积累，增加产量。杨建昌等（1996）的研究表明，不同土壤水分状况下氮素对作物光合速率和气孔导度的影响不尽相同。在土水势为 0 和 －30kPa 两种土壤水分状况下，中氮和高氮处理的叶片光合速率均较低氮处理有显著增加；当土水势为 －60KPa时，中氮处理显著提高了叶片的光合速率，高氮处理则降低了叶片的光合速率，气孔导度与光合速率的趋势一致。

李秧秧等研究表明，施肥有助于提高作物的净光合速率，N、P、K 均有此作用，但施肥提高作物净光合速率的程度依赖于作物受到土壤水胁迫的程度。如在轻度和中度水分胁迫下，N 水平较高的叶片其光合速率也较高；但在严重水分胁迫下，不同 N 水平之间的光合速率差异不大，在 25%的土壤相对含水量下，低 N 叶片的光合速率甚至高于高 N 叶片。当土壤含水量为持水量的 75%、50%和 30%，施 P 春小麦叶片的净光合速率分别为 9.52、6.31 和 4.19mg（CO_2）/(dm^2·h)，而相应的缺 P 处理则分别为 6.89、5.49 和 3.00mg（CO_2）/(dm^2·h)。在相同的土壤水分胁迫程度下，缺 K 玉米叶片的光合速率为 2.80μmol/(m^2·s)，而施 K 处理的则为 5.35μmol/(m^2·s)。由于在缺肥情况下，N、P、K 单施均有提高受旱作物叶片净光合速率的作用，因而混施情况下，施肥也明显提高了受旱作物叶片的净光合速率（穆兴民，1999）。杜建军等（1995）的研究结果表明，水分供应比较充分的条件下，施用氮肥能明显地增大冬小麦的叶面积，提高了净光合速率和叶片糖分浓度；水分供应不足，作物受到水分胁迫时，施肥处理的叶片气孔阻力较未施肥

处理的增大，对光合作用有不利影响，但由于叶肉细胞的光合活性增强，净光合速率仍然提高，糖分浓度依然增加。

(7) 提高作物水分利用效率

施肥显著增加了作物产量，因而也显著提高了水分利用效率。李世清等(1995)在低肥力田块的玉米试验表明，无论是籽粒还是干物质，施氮区与不施氮区相比，水分利用效率明显提高，用蒸散量计算出的水分利用效率 WUE_{ET} 均随施氮量增加而增加。未覆膜时施肥比未施肥籽粒增加 7.3kg/(hm^2 · mm)（增加效率为 59.5%），干物质增加 7.8kg/(hm^2 · mm)（24.3%）；覆膜时，籽粒增加 5.4kg/(hm^2 · mm)（103.6%），干物质增加 68.1kg/(hm^2 · mm)（54.3%）。小麦试验表明，在高肥力土壤上施肥对提高水分利用效率的作用不大，而在低肥力土壤上特别突出。低肥力田块，不论灌水与否，水分利用效率随施肥水平提高而显著提高，直到最高氮磷组合。平均每毫米水分利用效率比不施肥处理（N_0P_0）增加籽粒 3.8kg/hm^2；在高肥力田块，不灌水时，WUE_{ET} 随施肥水平的提高忽高忽低，无明显规律；灌水后 WUE_{ET} 随肥水平提高呈增加趋势，但增加幅度不大，仅比不施肥增加 1.4kg/(hm^2 · mm)。显然，施肥对高肥力土壤的水分利用效率影响不大（李生秀等，1995；高亚军等，1995）。这一事实充分说明在低肥力土壤上施肥才可以充分发挥“以肥调水”的作用。试验还表明，用蒸腾量计算，玉米的水分利用效率（WUE_{ET}），因产物不同而异；籽粒的 WUE_{ET} 与施氮量成直线关系（相关系数 $r=0.955^{**}$，$n=5$，** 表示相关系数达极显著水平。），而干物质的 WUE_{ET} 不随施氮量而变化（相关系数仅为 0.192，$n=5$），这表明施肥对提高经济产物的水分利用率更为有利。

1.2　旱地农田水肥的相互作用

在水资源有限的条件下，旱农地区农业生产的关键是水、肥的合理配合。拦蓄雨季地表径流或利用地下水，进行节水灌溉，配合施肥（特别是氮肥），充分发挥水肥的协同作用是近年来旱农地区研究的热点。不少研究表明，水肥交互作用与土壤肥力有密切关系。现以西北农业大学植物营养研究所在半干旱偏旱区澄城县高、低肥力红垆土（李生秀等，1995f；高亚军等，1995a）及杨陵中等肥力红油土（李世清等，1995）以冬小麦为对象所进行的试验资料为例，对此进行详细分析。

1.2.1　在低肥力土壤上水肥相互作用

在旱薄红垆土上研究表明，水肥皆有增产效果，肥料效果更突出，可使产量提高 2.16 倍，而灌水效果远较此逊色。两种肥料中，氮肥效果更引人注目，作物产量随施氮量增加而显著增高，而磷肥效果的大小则和氮肥配合、灌水与否有

密切关系。灌水和施肥均提高了作物产量，其间有明显的正交互作用，它们之间的交互作用值为157.4kg/hm²；不同用量的N、P配合也有明显交互作用，大小因灌水而不同。施入的肥料有一定后效，后效大小取决于肥料用量及前作产量。第二作持续施肥，肥效降低。灌水和施肥都提高了作物吸收N、P的数量，两者配合，吸收的数量更多。不同肥料组合对作物吸收N、P养分有不同效果，吸收氮量最高的肥料组合与产量最高的肥料组合不一致，表明了利于作物吸收养分的肥料组合不一定利于促进作物生长。氮磷肥料用量对作物吸收这两种养分的交互作用因灌水、前后作而不同，但两作吸收养分的多少有互补作用。在灌水情况下，氮素利用率随肥料增高而上升；未灌水时，则由低量到中量时上升，然后下降。第二作继续施肥时，利用率下降。土壤储水随产量升高而下降，作物耗水量则随产量上升而上升，耗水多者夏季休闲蓄水多，休闲效率高；反之则低。水分利用效率随N、P用量配合的升高而升高，耗水系数呈相反趋势。灌水与降水的水分利用效率基本等同。施肥后土壤的有效N、P有一定变化。表层0～20cm土壤有效磷有随施氮、施磷水平提高而提高的趋势，而0～100cm的硝态氮含量显然和原来施用氮肥的水平有关。

1.2.2 在中肥力土壤上水肥相互作用

在杨凌中等肥力的红油土上进行的玉米水肥配合试验（李世清等，1994）表明，施肥有明显的调水作用，灌水也有显著的调肥作用。灌水量少时，水肥的交互作用随肥料用量增加而增加；灌水量多则有相反趋势。灌水提高了当季作物产量和肥料利用率，却降低了后作产量及肥料效果。但从总体来看，灌水提高产量，增加肥效的作用仍然突出。不管灌水与否，当季作物的肥料利用率均随用量增加而降低，而两季作物的肥效却随用量增加而升高。水肥配合可改变籽粒和茎叶的构成，改变两者间的养分分配比例，有利于形成更多的经济产物。

中等肥力红油土上的试验表明（李世清等，1995），降水较丰的年份，灌水无效果；而合适的肥料配合则有突出的增产作用。在供试土壤矿质氮较高，有效磷较缺的情况下，最佳的肥料配合是N 45kg/hm²，P 29.4kg/hm²。当季作物收获后，施磷土壤有效磷变动不一；而施氮土壤剖面累积有大量硝态氮。土壤在休闲期间矿化出的无机氮素较高，休闲期间和后续作物生长期间的降水量又较少，肥料中残留的氮素虽使作物的吸氮量提高，但并未明显地提高作物产量。

1.2.3 在高肥力土壤上水肥相互作用

旱地红垆土上的试验结果表明，灌水效果特别突出，肥料效果相对逊色。不施肥时，灌水增产效果是旱薄地的3.3倍；施肥时，是1.7倍。虽然该土壤上的肥效

明显低于低肥力土壤，但施肥仍能提高作物产量，灌水后肥效更高。水肥之间虽有正交互作用，但甚低。灌水影响着不同用量氮磷组合的交互作用：未灌水，交互作用稳定而明显，N_{45} 与 $P_{14.7}$，N_{90} 与 $P_{29.4}$ 和 N_{135} 与 $P_{44.1}$ 间的交互作用分别为 267kg/hm^2，313kg/hm^2 和 337kg/hm^2；灌水后，低量氮磷配合（N_{45} 与 $P_{14.7}$）仍有 134kg/hm^2，而中、高量组合交互作用不大（分别为－6kg/hm^2 和 33kg/hm^2）。由于土壤养分供应较丰富，肥料无明显后效，持续施肥效果亦不大。这表明土壤养分有一定保证时，采取有效的措施改善土壤水分更有意义。

1.3　水肥相互作用模型及其应用

建立水分、养分高效耦合模型，使农业生产中水分和养分管理模式化和定量化，是农业发展的需要和出路。从目前看，建立和利用模型至少可以解决三方面的问题：第一，根据模型，判断水、肥两大因子在旱地农业生产中的主次作用；第二，确定水分和养分的交互作用的类型；第三，通过预测底墒、降水量，就可以根据模型确定目标产量，拟合合理的施肥量，为“以水定产”和“以水定肥”，初步实现水、肥应用定量化提供依据，从而做到区域内“以肥调水”、“以水促肥”、“肥水协调”，提高水肥利用效率，实现农业大面积增产。

目前常见的旱地水肥耦合效应模型多采用多元回归方程，即以产量为因变量，以水分和不同的营养物质或肥料为自变量，拟合多元方程而求得。如果考虑氮（N），磷（P）和水分（W）三个因子，则多元方程的通用型是：

$$Y=B_0+B_1\mathrm{N}+B_2P+B_3\mathrm{W}+B_4\mathrm{NP}+B_5\mathrm{NW}+B_6\mathrm{PW}+B_7\mathrm{N}^2+B_8\mathrm{P}^2+B_9\mathrm{W}^2$$

W 可代表播前 0～200cm 土层有效水（即底墒水），也可代表生育期降水＋灌水量（地面水量 W_R），也可代表底墒＋地面接水量（总墒 W_T）。

用这种方式建立的模型是经验模型。模型确定好后，可根据模型设计试验，容易建立，只要试验设计完善，得到数据可靠，则模型随之建立。缺点是，由于各田块情况不一，一个田块所建立的模型无通用性，必须进行多个田块试验，采用聚类方法求出通用模型。

回归耦合模型的建立过程可以用一个田间资料来说明。该试验在合阳进行，采用非饱和-D 最优回归设计，根据得到的资料（表 1-1），用非饱和-D 最优回归通用程序回归模拟，得到小麦产量（Y）与 N(X_1)、P_2O_5(X_2)、水(W)三因素之间的回归模型为：

$$Y=2520+166.353X_1+97.845X_2+187.469W-39.60X_1^2-39.60X_2^2-17.59W^2+25.985X_1X_2+38.51X_1W+26.08X_2W$$

经检验，模型的 $F=88.1529$（$F_{0.05}=24.1$，$F_{0.01}=60.2$），$R=0.9999$。

说明模型的回归关系达到高度显著标准，确能反映产量的变化过程，可以作为预测预报的依据。但是，方程显著并不等于各个回归系数都显著，因此对回归系数

的显著性尚需采用 t 检验法进行检验，结果为：

$t_1=45.377$ $t_2=26.697$ $t_3=51.141$ $t_4=28.974$ $t_5=28.974$ $t_6=4.594$

$t_7=12.276$ $t_8=26.965$ $t_9=12.0372$ （$t_{0.05}=12.706$，$t_{0.01}=63.657$）

一次项 X_1、X_2、W 和二次项 X_1^2、X_2^2 均达到显著水平，说明氮、磷和水分对小麦产量均影响较大。在交互项中，X_1X_2、X_2W 接近显著水平，X_1W 达显著水平，说明氮水交互作用大于磷水交互作用。

表 1-1 合阳旱棚氮磷水模拟试验方案与产量

处理号	因素编码值			实际用量			产量 /(kg/hm²)
	X_1(N)	X_2(P_2O_5)	W(水)	X_1(N) /kg·hm^{-2}	X_2(P_2O_5) /kg·hm^{-2}	W(水)/mm	
1	0	0	2	112.5	112.5	880	2805
2	0	0	−2	112.5	112.5	350	2070
3	−1.414	−1.414	1	30.0	30.0	747	1785
4	1.414	−1.414	1	180.0	30.0	747	2355
5	−1.414	1.414	1	30.0	180.0	747	2010
6	1.414	1.414	1	180.0	180.0	747	2940
7	2	0	−1	225.0	112.5	481	2025
8	−2	0	−1	0.0	112.5	481	1755
9	0	2	−1	112.5	180.0	481	1995
10	0	−2	−1	112.5	0.0	481	1785
11	0	0	0	112.5	112.5	614	2520
12	−2	−2	0	0.0	0.0	614	1710

在建立这一回归模型时，计算过程中应用的是无量纲线性编码，因此所求得的偏回归系数已标准化，其绝对值大小可直接反映各变量对产量的影响程度，由一次项和二次项的偏回归系数和 t 检验可以看出各因素对产量影响的顺序为：水(W)＞N(X_1)＞P_2O_5(X_2)。

对原模型进行降维，固定其他因素为零水平，便得各因素量的一元二次子模型为：

N：$Y=2520+166.353X_1-39.60X_1^2$

P_2O_5：$Y=2520+97.845X_2-39.60X_2^2$

水：$Y=2520+187.469W-17.59W^2$

以各因素的不同水平值代入以上模型，即得各因素在不同水平下的产量预测值。水分产量效应呈上升曲线，对产量影响最大；氮、磷产量效应呈抛物线，都有

明显增产作用，且氮肥效果高于磷肥。

边际产量反映各因素单位水平投入量变化对产量增减速率的影响程度。各因素在不同水平下的边际产量，可通过对回归子模型求一阶偏导，将不同编码值代入，并令 $\delta y_1/\delta x_1=0$ 来求得。当这些因子取低水平值时，增产效益最大；取高水平值时，增产效益较低；最适投入量为与 X 轴相交之处，超过最适投入量，效益即出现负值，水分的最适投入量超出了设计范围。水分对产量虽然影响最大，但随着投入量的再增加，经济效益增长较平缓。从经济效益看，在本试验条件下，单因素最适投入量为纯 N 150kg/hm^2，P_2O_5 35kg/hm^2，水 880mm/hm^2。由此可见，水、氮、磷是渭北旱塬小麦生长中的主要限制因素。

除了通用回归模型外，有人还提出了一种转换模型（吕殿青等，1995）。建立的办法是，首先在不同水分含量条件进行系列的肥料试验，根据试验资料，建立不同水分条件下的肥料效应函数；其次，假定肥料效应函数式中的每项回归系数是土壤水分的函数，于是以这些回归系数为因变量，以水分为自变量，建立回归方程；然后将回归系数方程中的相应值代入肥料效应方程，取代其回归系数，于是回归系数就变成了有水分变量加入的参数；整理求解，就可得到肥水效应转换耦合模型。由于这一模型仅把回归系数的差异归之于水分，忽略了土壤因子，假定不够合理，数学基础也不够严密，故不再予以论述。

但这些模型仍缺乏共性，未能完全反映共性规律，因而也无法被广泛应用。首先，目前研究水分和养分的耦合模型时，没有把土壤养分考虑在内，没有对土壤养分进行可靠的测定和估计，由于作物由土壤中摄取的养分占 50%以上，不考虑土壤供应养分的情况，得出的水分和肥料的耦合模型就缺乏共性、无法在不同肥力的农田上进行应用，也无法进行有效的水、肥调控，达到高效、高产的目标；其次，除建立产量-水分-肥料的二次回归模型外，还应当建立生长机理模型，即通过土壤-植物系统内的质流、蒸腾、光合及同化作用的关系建模，根据模型计算不同水分、养分条件下的作物产量，这种模型的优点是便于进行多变量条件下产量形成因素的分析（李生秀，1999）。

自“八五”以来，我国在水肥耦合效应及其模型的研究和应用方面取得了显著成绩，耦合效应模型几乎在全国不同地区、不同作物上都得到了应用。

孟兆江等（1998）通过模型研究认为，小麦水肥配合存在阈值反应，低于阈值下限水平，N、P 无明显增产效应，水分利用效率低；高于阈值上限，水肥互作效应呈减小趋势；在阈值范围内，水肥互作增产效应显著。并建立作物的产量（Y）与施 P 量（X_1），施 N 量（X_2），灌水量（X_3）数学模型：

$$Y=6487.709+242.6355X_1+310.5735X_2+400.9305X_3+19.518X_1X_2-13.9695X_1X_3+236.157X_2X_3-11.9325X_1^2-20.3055X_2^2-33.609X_3^2$$

对方程各项回归系数的检验表明，以灌水量对产量影响最大；N 肥与灌水量

间有明显交互作用；N、P、水配合的阈值施 N(N) 量为 90～240kg/hm²，施 P (P_2O_5) 量为 56.25～221.25kg/hm²，灌水量为 1500～3750m³/hm²。

刘作新等（2000）在辽西也提出了类似的阈值。吕殿青（1994）、王翠玲（2000）等研究了水肥交互效应及对产量的影响顺序。结果表明，在一定条件下，氮磷、氮水的交互效应为协同作用型，磷水为拮抗型。当氮、磷、水同时投入时，磷水拮抗型转变为协同作用型。三者的影响顺序为水＞氮＞磷。王殿武（1999）、金轲（1999）、李法云（2000）在半干旱区也得出同样结论。

孟兆江等（1997）在玉米耦合模型中也发现有阈值反应，其模型如下：

$$Y=504.4577+26.9719X_1+14.6231X_2+30.4856X_3+9.200X_1X_2+9.600X_1X_3+0.625X_2X_3-9.752X_1^2+4.3051X_2^2+2.1904X_3^2$$

在交互项中，N、P 互作（X_1X_2）和 N、水（X_1X_3）互作回归系数均达显著水平，其阈值 N 为 105kg/hm²，P_2O_5 为 52.5kg/hm²，灌溉定额 1500m³/hm²。低于阈值水平，N、P 无明显增产效应，水分利用率低；高于阈值，水肥互作增产效应显著。刘文兆等通过对作物水肥耦合分析，不仅建立了水肥供应与玉米产量、耗水量的关系模型，还建立了耦合区域的图形。

金柯（1999）在以不同 N、P、水配合对旱地冬小麦产量的影响试验中得出回归方程（N：X_1，P_2O_5：X_2，水：X_3）：

$$Y=3492.05+90.66X_1+27.98X_2+261.89X_3-46.67X_1X_2+58.99X_1X_3-16.19X_2X_3-107.82X_1^2-82.6X_2^2-8.87X_3^2$$

由回归系数的检验得知：单因素的贡献率 N＞P＞水；两因素交互作用 N×水＞N×P＞P×水。即：底墒水充足，N 对小麦的产量影响最大；N 和水的交互作用对小麦的产量贡献最大。

王殿武等（1999）根据冀西北高原旱薄相随，且以薄为主的地势，提出莜麦水肥合理耦合模型：

$$Y=632.93+6.06N+6.22P+10.48W+0.012NP+0.028NW+0.004PW-0.066N^2-0.04P^2-0.015W^2$$

根据回归系数分析，从二次项系数均为负值可知，小麦产量随着水、N、P 投入量增加均同样表现为开口向下的抛物线。试验表明，干旱年（150mm）以 N 60kg/hm²、P 90kg/hm² 处理时水分利用率最高，再增加 N 肥，产量反而下降；其他年均为 N 120kg/hm²、P 90kg/hm² 处理最高，且以平水年（350mm）为最佳。

影响棉花产量的诸多因素中，水和肥适时适宜的施用同样起着十分关键的作用。冯绍元等（1998）认为在一定的 N 素水平下（施纯 N 150～225kg/hm²），棉花产量增加较快。郑重（2000）、胡顺军等（2005）发现水分是限制滴灌棉花产量的主导因素，施肥次之；N 水在一定的配比下存在协同效应；郑重等研究结果认

为，以灌水 225mm、施纯 N 150kg/hm² 处理较为合理。在水分适宜或较高时，限制产量的主要原因是土壤贫瘠和肥力不足；平衡施肥其施肥水平有一个阈值，超过此值产量将会降低。

胡顺军等还建立了棉花水肥相互效应回归模型：

$$Y=1684.9062+24.9888I-0.0546I^2+1.2284F-0.0049F^2+0.0212IF$$

交互项 I(水)、F(肥) 的系数为正，说明水肥存在协同效应，除了在一次项中反映出增产效果外，还在交互项中有进一步扩大增产的效果。

东北半干旱区大豆水肥耦合效应中，郭正芬（2005）、周欣、腾云等（2007）都建立了大豆水肥耦合数学模型，同样发现水是主要影响因子。在水分充足时，N 肥施用量会使大豆产量达到最高值，再增施 N 肥，大豆产量反而会随着 N 肥施用量的增加而降低。郭正芬进行回归模拟，得到大豆盆栽产量（Y）与施 N 量（X_1）、施 P 量（X_2）、施 K 量（X_3）、土壤水分含量（X_4）的数学回归效应模型如下：

$$Y=30.2+1.57X_1+0.42X_2-2.0X_3+9.76X_4+1.35X_1X_2-0.42X_1X_3+1.57X_1X_4+0.59X_2X_3+0.81X_2X_4+0.96X_3X_4+7.23X_1^2-2.0X_2^2+0.78X_3^2-1.86X_4^2$$

各因素对大豆产量均有影响，其作用大小顺序是：水分＞K 肥＞N 肥＞P 肥，且 K 肥是负效应。在交互项中 X_1X_2 和 X_1X_4 比较显著，说明 N 与 P、N 与水有一定的交互效应；且一定 N 肥施用量在水分充足时产量达最高值。

腾云等（2005）对影响大豆产量的 N、P、K 三种肥料在其中两种用量不变的前提下，其中一种肥料和水的耦合效应分别进行了研究。结果表明，水肥配合存在阈值反应，提出了 N 肥（X_1）、水（X_2）配合与大豆产量数学模型：

$$Y=1725.045+254.9738X_1+84.4738X_2+450.6247X_1^2-103.945X_2^2+323.7238X_1X_2$$

方程中一次项的回归系数 X_1 大于 X_2，表明 N 肥＞水分效应，试验发现 N、水配合有一个阈值反应。当 P_2O_5 用量为 133.86kg/hm²，K_2O 用量为 200.79kg/hm² 时，N、水配合的阈值范围是 N 肥 147.768～182.232kg/hm²，坐水 39～96m³/hm²，在此范围内 N 与水互作增产效应显著；同理在 P 水、K 水配合中也同样发现一个阈值反应。

水稻中同样存在报酬递减效应，在一定水分状况下，适量施肥可以增产，超过一定量反而减产。杨建昌等（1996）研究表明，当土壤水分充足或土壤干旱较重时，产量为中 N＞高 N＞低 N。稻作水肥效应中土壤水分和 N 素营养对水稻生长有明显的互作效应。陈新红等（2006）得出了土壤水分和 N 肥互作对水稻产量影响的数学模型：

$$Y=41.04+10.67X_1+0.0034X_2-0.99X_1^2-0.005X_2^2-0.018X_1X_2$$

（X_1 为施 N 量；X_2 为土壤水势）

渭北旱地夏播谷子水肥耦合试验模型表明，水分和肥料对谷子的生物学产量、籽粒产量和根系发育的耦合影响不同，但有一个共同点，就是肥料的作用大于水分的作用，特别是肥料对谷子生物学产量影响最大。

水肥对二年生沙打旺产草量的协同效应试验说明，水肥对沙打旺产草量有明显的正主效应和交互效应，水分平均主效应为肥料效应的4.7倍；沙打旺水肥效应函数为一报酬递减函数，在这个函数中，水肥效应有一个合理组合区；在该区域内增加水肥均能达到增产之目的，且水肥作用具有互补性，即土壤水分（或施肥量）的降低可用增施肥料（或提高土壤水分）来补偿以保证产草量不减。尽管水肥都具有增产效果，但水分增产效率随含水量提高而降低，肥料的增产效率随含水量提高而提高，随施肥量增大而减小。

新疆膜下滴灌棉花试验水肥耦合效应明显，一定水肥范围内的叶面积指数（LAI）、散射光透过率（TD）在花铃期随灌水和施肥量的增加而增大，并以灌水225mm，施纯N 150kg/hm^2 处理较为合理，LAI和TD值分别为1.56～3.95和23.4%～35.7%；水分是限制滴灌棉花产量的主导因素，施肥次之。

杨树的水、氮、磷试验表明，水分对杨树生物量影响最大，其次是磷肥和氮肥，说明水分是影响杨树生物量的主导因素。水分和氮肥、氮肥和磷肥间存在交互效应，且水分和氮肥的交互作用＞氮肥和磷肥的交互作用，而水分和磷肥的交互作用不明显。

吉林省西部盐化黑钙土区芝麻水肥试验表明，水是肥效发挥好坏的重要限制因子，氮、钾、水三因素对芝麻的增产效应次序为水＞氮＞钾，三因素配合效应＞两因素配合效应＞单因素效应，水分是氮、钾两因子协调发挥作用的重要限制因素，在供水充足的情况下，适当的提高氮、钾肥的用量，可使产量增加。

相对来说，对保护地蔬菜的水肥耦合研究较少。葛晓光等的试验表明，对甜椒生育和产量形成影响较大的因子是密度和肥料，水、肥的交互作用显著。宁夏银川市的日光温室滴灌辣椒水肥耦合效应研究指出，水、氮、磷各因素影响滴灌辣椒产量的顺序为灌水量＞施磷量＞施氮量；灌水量与施磷量及施磷量与施氮量的交互作用较显著，尤以高水配以低磷，高氮配低磷时产量在所取水平范围内产量达最大值。梁运江等试验表明，水、氮、磷三个因素对辣椒产量的影响大小基本相近。灌水量和氮肥、氮肥和磷肥对辣椒产量的耦合作用为负效应，灌水量和磷肥对产量的耦合作用为正效应。贺超兴等的研究表明，各因子对番茄产量影响的大小顺序为：灌水量＞氮肥＞钾肥。氮、钾与灌水量对番茄增产有明显的正交互作用，通过适当的肥水配合不但可提高肥料利用率而且还可促进番茄高产。虞娜等用三元二次多项式拟和番茄产量与氮肥、钾肥用量及灌水下限间的关系，得出类似结果。各因素对番茄产量影响作用顺序为：灌水下限＞氮肥用量＞钾肥用量，施肥与灌水下限有明显的正交互作用，且氮肥与灌水下限的交互作用＞钾肥与灌水下限的交互作用。

随着研究的不断深入和发展，一些研究还涉及了水肥空间耦合。研究不同空间耦合方式对玉米产量的影响，发现在562.5m³/hm² 和300m³/hm² 的灌水量下，不同水肥耦合方式玉米产量表现出相同的规律：水肥异区交替灌水＞水肥同区交替灌水＞均匀施肥交替灌水，其水肥因子均符合报酬递减定律。

目前对旱地水分和肥料的耦合模型虽然做了不少工作，但在这一领域还需进一步深入研究，必须通过严格的试验和实践检验，确实证明模型的效果和价值，使其具有通用性，这将是我们今后研究的重点。

参 考 文 献

[1] 山仑，陈培元．旱地农业生理生态基础［M］．北京：科学出版社，1998：1-17.

[2] Li Sheng xiu，Xiao Jun zhang，Cheng su yun．Soil water management on drylands in china［C］// Proceedings of the International conference on Dryland Farming：challenge in dryland Agriculture— A globle perspective. Texas，Amarillo/Bushland：1998：201-204.

[3] 汪德水．旱地农田水肥关系原理及调控技术［M］．北京：中国农业科技出版社，1995.

[4] Cooper P. The effect of nitrogen supply on growth，water use and yields of barley at five location in northern Syria［C］// Soil water and nutrient research 1979～1980. Aleppo，Syria（ICARDA）：The international center for agricultural research in the dry area，1981：1-57.

[5] 李生秀．我国土壤-植物营养研究的进展、现状及展望［G］//土壤-植物营养研究文集．西安：陕西科学技术出版社，1999：1-36.

[6] 马强，宇万太，沈善敏等．旱地农田水肥效应研究进展［J］．应用生态学报，2007，18（3）：665-673.

[7] 刘文菊，李美茹，赵全利等．水分、磷肥耦合对小麦各生育期土壤中氮磷养分的影响［J］．华北农学报，2006，21（增刊）：46-50.

[8] 张喜英．作物根系与土壤水利用［M］．北京：气象出版社，1999：122-147.

[9] 张岁岐，山仑．氮素营养对春小麦抗旱适应性及水分利用的影响［J］．水土保持研究，1995，2（1）：31-35.

[10] 徐萌，山仑．不同土壤水分条件下无机营养对春小麦水分状况和渗透调节的影响［J］．植物学报，1992，34（8）：596-602.

[11] Gutierrez-Boem F H，G W. Phosphorus nutrition effects wheat response to water deficit［J］. Agro J，1998，90：375-383.

[12] Bray E A. Plant response to water deficit［J］. Trend in plant Sci，1997，2（2）：48-54.

[13] 穆兴民．水肥耦合效应与协同管理［M］．北京：中国林业出版社，1999：44-65，89-96.

[14] 孙群，李学俊，达娃．氮素对水分胁迫下玉米苗期生长和某些生理特性的影响［M］//作物栽培生理研究．北京：中国农业科技出版社，1998：159-161.

[15] 苗果园，伊钧．旱地小麦降水年型与氮素供应对产量的互作效应与土壤水分动态的研究［J］．作物学报，1997，23：263-270.

[16] Bray E A. Plant response to water deficit［J］. Trend in plant sci，1997，2（2）：48-54.

[17] Meyer R D，Marcum D B. Potato yield，petiole nitrogen and soil nitrogen response to water and nitrogen［J］. Agro J，1998：420-429.

[18] 穆兴民．旱地作物生育对土壤水肥耦联的响应研究进展［J］．生态农业研究，1999，7（1）：43-46.

[19] Pala M，Matar A，Mazid A. Assessment of the effects of environmental factors on the response of wheat to fertilizer in on-farm trials in Northern Syria［J］. Exp Agric，1996，32（3）：339-349.

[20] James R F，James J. Camberato. Water and nitrogen effects on winter wheat in the southeastern coastal plain：I. grain yield and kernel traits［J］. Agron J，1995，87：521-526.

[21] 文宏达，刘玉柱，李晓丽等．水肥耦合与旱地农业持续发展［J］．土壤与环境，2002，11（3）：315-318.

[22] 谢小婷，黄璜，陈玉艳等．作物水肥耦合产量效应模型研究进展［J］．湖南农业科学，2008，（3）：58-61.

[23] 卢全新，李洪明．旱地农田水肥交互作用及耦合模型研究［J］．水利科技与经济，2008，14（8）：625-628.

[24] 张广涛，汪可欣等. 水肥耦合技术在辽宁地区农业可持续发展中的应用分析 [J]. 安徽农业科学，2007，35 (24)：7531-7555.
[25] 梁运江，依艳丽，许广波等. 水肥耦合效应的研究进展与展望 [J]. 湖北农业科学，2006，45 (3)：385-388.
[26] 李生秀等. 中国旱地农业 [M]. 北京：中国农业出版社，2004.
[27] 李生秀等. 中国旱地土壤植物氮素 [M]. 北京：科学出版社，2008.

第 2 章　旱地土壤保墒技术

2.1　农业蓄水保墒机制

我国干旱地区水资源主要依赖于自然降水和人工灌溉。土壤是多孔介质，大小不同的各种颗粒间存在大大小小的许多孔隙，自然降水或人工灌溉后，水分受重力作用沿土壤孔隙下渗，下渗过程中，水分因土粒分子引力或毛细管引力作用而被保持在土体中，形成容量庞大的“土壤水库”。研究结果表明，不同土质土壤的库容能力不同，1m 深黄土可蓄水 250～300mm，即 1m 深黄土层可蓄水 2500～3000m^3/hm^2。

2.1.1　农田土壤水分状态

土壤耕层构造由耕作土壤及其覆盖物组成，是人类耕作加工土壤后形成的犁底层、内部结构表面形态及覆盖物的总称。其中表面形态和覆盖物决定了大气与土壤水、气、热的关系，造成好气、嫌气性土壤环境，进而控制好气、嫌气性生物学过程，是使耕层土壤养分的消耗积累进程发生变化的主要因素。土壤耕层是“土壤水库”的主要蓄水保墒层，此层中水存在 3 种形态：固态、气态和液态（图 2-1）。其中液态水主要存在于土粒周围及毛细管孔隙内，对作物根系吸收有重要作用。液态水按其在土粒间的理化特性可分为：吸湿水、薄膜水、毛管水、重力水和地下水等。现对几种重要的水分说明如下。

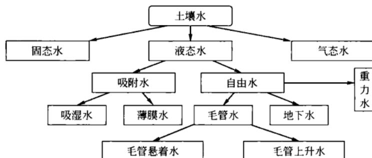


图 2-1　土壤水形态

2.1.1.1　吸湿水

吸湿水是受土壤颗粒表面分子吸附作用束缚在土粒表面的水分。由于受分子引

力达几千甚至上万个大气压，因而不能被植物根系吸收利用。

2.1.1.2 薄膜水

土壤颗粒周围与水分接触时的分子引力将水吸附到其表层，形成一层膜状液态水称为薄膜水，薄膜水所受分子引力约 633281.25～3141075.00Pa，而作物根毛吸水力约为 1519875Pa，因此仅有部分薄膜水可为作物吸收。

2.1.1.3 毛管水

毛管水是土壤颗粒中细小孔隙的表面张力吸持在土壤中的水分。毛管水所受引力仅为 28371.00～633281.25Pa，可全部为作物吸收利用，具有溶解养分、运动迅速等特点，可不断供给作物耗水。毛管水是土壤水分特别是干旱地区农田土壤水中最重要的部分。它又可分为毛管悬着水和毛管上升水。毛管悬着水指在地形部位较高，地下水位较深，降水或灌水后，借助毛管引力保持在上层土壤中的水分。毛管悬着水达最大时的土壤含水量称田间持水量，它是植物利用有效水的上限，也是计算灌溉量进行节水灌溉的重要参数。毛管上升水系指在地形低洼地区，由于地下水位浅，借毛管作用上升的水分。毛管上升水达最大时的土壤含水量称毛管持水量。

2.1.1.4 重力水

土壤含水量达田间持水量后，超量水分在重力作用下，沿土壤大孔隙下渗的水分称重力水。重力水很快下渗至耕层以下，不能给作物持续供水。

2.1.2 农业蓄水保墒机制

2.1.2.1 作物的水分胁迫与水分调控

水是作物体重要的组成部分，在植物的生命活动中起着十分重要的生理生态作用。植物主要通过根系从土壤中吸收水分，靠体内输导系统输送到各个组织中去。植物体的水分状况由水分收入和支出两个方面决定，植物体内的水分入不敷出时，植物处于水分胁迫状态。水分的收入主要依靠作物根系吸取。土壤水分亏缺及作物根系吸水不足，就会产生作物体内的水分胁迫。

水分胁迫影响作物一系列的生理生化过程，水分亏缺时，作物气孔开张度将变小，以降低蒸腾作用来调节作物体内水分平衡关系。但气孔变小也减少了光合作用所需的原料——二氧化碳进入叶片，光合强度下降，同时，由于物质与能量交换被削弱，叶片温度升高，容易造成叶绿素结构的破坏，降低光合效率，而且作物的呼吸作用加强，有机物质积累减少，营养物质运输缓慢，造成作物生物产量下降。

影响作物光合作用的水分利用效率（指蒸腾 1kg 的水所能同化的二氧化碳克数）的四个环境因子是光合有效辐射、土壤水势、气温和土壤盐分。随着气温的升高和土壤水势的降低，水分利用效率提高。当土壤水分亏缺时，土壤水势增大，作物的蒸腾系数变大，水分利用效率下降。虽然土壤缺水时，能量平衡中潜热交换减少，作物冠层气温会有所升高，有利于提高水分利用效率，但可能会造成升温幅度过大，超出适宜温度范围，反而限制了同化作用，影响水分利用效率的提高。综合

考虑温、水的影响，在土壤缺水时，会降低光合速率与水分利用效率。

所以，在北方旱农地区的旱作农田，提高作物产量意味着提高作物的光合效率和水分利用效率，同时也意味着作物耗水量的增加。相反，农田缺水限制了作物产量的提高。因此，在水分来源有限的情况下，需要通过农田水分调控技术来实现有限水源的合理利用。

2.1.2.2　农业蓄水保墒的基本原理

改变下垫面的状况，以影响能量平衡收支状况。不同下垫面的能量平衡状况不一，人类可以通过一系列的农业措施来改造下垫面，使近地气层的能量分配和农田水分状况发生变化，创造出干旱气候下有利于作物生长发育的微气候环境。

改变土壤结构和土壤水文常数，培育良好的土壤水分库容结构，通过土壤对季节性水分亏缺进行调节，使作物形成理想的株型，沿着正确的生物学轨道发展。

调节农田水肥关系，通过培肥地力，可以有效地改善干旱气候条件下作物的生理生化过程，提高作物光合作用强度和水分利用效率，进而实现理想的作物产量。

2.1.2.3　农田蓄水保墒的技术原则

我国北方旱农地区农田蓄水保墒技术的选择，应充分考虑到自然资源特点、社会经济特征以及生态环境的保护与改善，对影响旱作农业发展的关键因子和薄弱环节进行改造，以达到节水增产的目的。其中关键技术是充分利用当地的自然资源，控制与利用径流，减轻土壤侵蚀退化，提高自然降水的保蓄率和利用率，抑制无效蒸发，提高作物的水分利用率。

首先应以当地资源条件和农田水分状况为依据，建立适宜的作物种植方式，耕作体系和轮作制度，来适应干旱环境，提高保水率和水分利用率；其次是对影响作物生长发育和产量的障碍因子以及薄弱环节实施治理和改造，抗御不利因素的影响，所使用的调控技术要具有可操作性，并能产生较好的经济、社会和生态效益。

在我国北方主要旱农地区进行的农田水分调控技术研究表明。只要技术合理，措施得当，农田供水和作物需水的矛盾均可在一定程度上得到缓解和解决。

2.2　旱地土壤的蓄水技术

各种耕作措施如覆盖、深耕、少耕、免耕、深松及调整种植结构，实行合理轮作、间作、套作、等高种植等均能有效地改善土壤理化性质，加厚土壤耕层深度，扩大和建立良好的土壤库容量，增加降水或灌溉水的入渗，抑制水分蒸发，达到蓄水保墒的目的，从而为干旱地区农业抗旱耕作及节水灌溉提供了保障。

我国北方干旱地区降水受季风的影响很大，雨量主要集中在 7～9 月，土壤水分有明显的周期变化。根据土壤水分的变化规律，我国旱农地区常采用蓄水技术主要有以下几项。

2.2.1 翻耕法

翻耕法是我国及北方土壤耕作的主要方法，具有悠久的历史和旺盛的生命力，它所用的主要工具是铧式犁，一般由畜力或机械牵引。翻耕法需要和耙、耱、镇压等表土耕作措施配套．方能为作物播种提供平整的田面。

翻耕对土壤作用较大。主要表现在：翻转耕层有助于消灭杂草和病虫害；使原来较紧实的耕层变得比较疏松，对增加耕层厚度，增加土壤通透性，促进好气微生物活动和土壤养分的有效化有重要作用；把作物残茬和有机肥翻到耕层内，地表清洁，再通过耙耱建造松碎的耕作层。有利于保证播种质量，伏天深翻晒垡，有利于土壤有机质矿化，又可蓄纳雨水；深耕能够创造深厚的耕作层，增大雨水入渗速度和数量，提高农田的耐旱涝能力。同时，也能促进土壤熟化，增厚活土层，充分发挥肥效，有利于作物的根系发育，适时适度地进行深耕，能显著增产。研究表明，翻耕使土壤容重降低 0.1～0.2g/cm^3，非毛管孔隙率增加 3%～5%，土壤持水量增加 2%～7%。深耕过的田地，蓄水量一般比浅耕地多。且打破了犁底层，更便于作物根系下伸吸收利用深层的水分和养料。据山东省农业科学院的资料表明，深耕 34cm 的田块，小麦根系可下扎到 150cm 深，而浅耕 17cm 的田块，小麦根系仅下扎 90cm。另有资料表明，深耕还可以促进根系利用下层土壤的磷素。这对于促进籽粒饱满与根系的发育，都有良好作用。农谚“深耕一寸，等于上粪”就是这个道理。

传统翻耕法也有其自身固有的弱点，特别是长期使用大中型拖拉机翻耕，其弱点暴露得更为明显，主要表现在：翻耕后留下疏松而裸露的蒸发面，在风吹日晒下很容易损失水分，产生水蚀和风蚀，同时对大气环境造成不良影响，对干旱地区不利；翻耕使土壤有机质矿化加快，长期连用会降低土壤潜在肥力；多次动土，破坏土壤结构；长期机械工具碾压耕层，易形成坚硬的犁底层，不利作物生长。

深翻耕一般多用有壁犁进行。以犁壁形态和翻耕方法分，有半翻法、全翻法和分层翻法。半翻法系用熟地型犁将垡片翻转 135°，翻后垡片彼此相连，覆盖成瓦状。这种方法牵引阻力小，兼有较好的翻土和碎土作用，适应一般熟地用。但其垡片覆盖不严，灭草性能不如全翻法。目前，我国北方机耕多用此法。全翻法采用螺旋型犁壁将垡片翻转 180°。本法翻土完全，覆盖严密，灭草性强，但耗能大，碎土作用小。故只适合于开荒，不适宜熟耕地。分层翻法采用带有小前犁的复式犁，将犁底层分层翻转。小犁铧耕深为犁铧的一半，耕幅约为主铧的三分之二，这种方法覆盖比较严密、质量较高。

深耕的时间应与当地雨季来临相吻合，以便充分接纳降水，增加土壤中的蓄水量。甘肃省农业科学院在庆阳彭厚乡蔡家嘴生产队试验的结果：7 月上、中、下旬深耕的农田，与 8 月上旬深耕的相比，0～100cm 土壤中的储水量分别高出 20.63cm，22.75cm 和 11.75cm。其中以 7 月中旬头伏深耕地的效果最佳。西北农

林科技大学“八五”、“九五”在陕西省蒲城县和乾县研究的结果表明：伏前深翻耕的麦田次年冬小麦 3900kg/hm^2，头伏深翻耕的 3375kg/hm^2，二伏深翻耕的 3150kg/hm^2，三伏深翻耕的只有 2400kg/hm^2，伏前深翻耕的比伏后深翻耕的增产 62.4%。这也证明，“头伏耕地一碗水，二伏耕地半碗水，三伏耕地碗底水”这一传统经验是符合我国北方旱区实际情况的。所以说，伏深翻要早，早翻能将伏天的暴雨大部分蓄入土壤之中，迟了雨季已过，对蓄墒的作用即大为降低。如果因为地多，一时耕不过来，可先进行浅耕灭茬或耙地灭茬，打破地表，以利降雨下渗。秋季深耕的时间，一般于秋作物收后要抓紧时间进行，据青海省农业科学院在湟中县上新庄的测试，秋耕时间不同，对于土壤蓄水量的影响也很大。秋收后及时进行深翻耕的，在 0～100cm 的土层中蓄水达到 293mm；收获后的第四天耕翻的，蓄水即减少 29.6mm；第 7 天耕翻的，蓄水减少 56mm，而收后 10 天尚未耕翻的蓄水则要减少 65.6mm。由此可见，秋作物收后也要尽早耕翻，切断毛管能减少地表蒸发，也接纳部分秋季降水。

2.2.2 深松耕

深松耕就是用无壁犁、松土铲、凿型铲对土层进行全面的或间隔的深位疏松土层而不翻转土层的一种土壤耕作方式。所使用的犁，称为松土犁或深松犁。翻转耕层的深耕翻，固然有消灭杂草，翻埋肥料、秸秆及减少病虫等良好的作用，但在翻耕的过程中，亦将散失大量的土壤水分，尤其是在干旱和半干旱地区，这是很不利的。此外，翻耕时消耗的牵引力较大，工作效率也低，不利于抢墒及时播种。因此，世界各国多有松土而不翻土的深松耕作法，我国近些年也立项推广该项技术。深松虽可克服深翻作业的某些缺点，却不能翻埋肥料、杂草、秸秆及减少病虫，也是其不足之处。为了克服这一缺点，常在深松之后再进行一次旋耕作业。深松耕法目前主要有两种方式。

2.2.2.1 全面深松

应用深松犁全面松土。松后耕层呈比较均匀的疏松状。此种方式所需动力较大，适于配合农田基本建设，改造耕层浅的黏质硬土。山西省东南地区从 1982 年起在旱地麦田进行深松试验，到 1984 年夏秋扩大示范了万亩左右，结果表明，深松降低了底层土壤容重，增大了土壤孔隙度，提高了降水入渗量，深松比翻耕小麦根量增加 11%～22%，产量增加 5.9%～29.6%。辽宁省西部风沙地改良利用研究所的试验中深松耕地种植的玉米，较平翻后种植的增产 18.7%。深松耕作法在旱地农业中有重要的推广研究价值。

2.2.2.2 局部深松

应用杆齿、凿形铲或铧形铲进行松土与不松土相间隔的局部松土，松后地面呈疏松带与紧实带相间存在的状态。此种局部深松方式可在播种前的休闲地上进行。据黑龙江深松协作组的测定，垄沟深松的虚处（疏松带）土壤容重 0～10cm 为

0.80g/cm³，10～20cm 为 1.03g/cm³，20～30cm 为 1.09g/cm³；垄体的实处（紧实带）则分别为 1.12～115g/cm³，1.15～1.25g/cm³ 和 1.20～1.26g/cm³。此种局部深松方式，由于在耕层内并列存在着疏松与紧实相间的条带，有利于降雨的间隔深松的方式，其紧实带的存在，还可以阻止已渗入耕层的水分，沿耕作层内向坡下移动。同时，疏松带除在降雨时有利于雨水下渗之外，雨后则有利于土壤的通气及好气性微生物的活动，可促进土壤养分的有效化。所以局部深松的耕作方式，有明显的蓄水及增产效果。据在宁夏固原的观测结果，深松 30mm 打破后，一般 30～60cm 土壤中的储水量比对照多 8.6%～30.1%，平均相当全年多蓄降雨 80mm 左右，或相当于每亩（1 亩＝667m²）多灌一次 50cm³ 的水。

2.2.3 水平等高耕作

水平等高耕作也是在坡地上采用的一种集水蓄墒耕作技术，有时也称作横坡耕种或等高种植。它是在原面的缓坡地上改变原来的顺坡耕作为横坡耕作。所有在坡地上的耕种措施，如耕翻、播种、中耕等均沿水平等高线进行。这样操作，地上自然形成许多等高蓄水的小犁沟和作物行，可以拦截径流，增加降水的入渗率。据甘肃省西峰水土保持科学试验站的试验，在 2°左右的坡地上，等高耕种比顺坡耕种减少径流量 51.4%～57.37%，在 0～70cm 的土层内，其土壤水分含量比顺坡耕种的高 2.80%～9.59%。据天水水土保持试验站观测，等高耕作比顺坡耕作一般增产 10%～20%。所以在坡度不大的坡地上，如小于 5°情况下，实行等高耕作可达到一定程度的集水、增渗、增产的目的。同时又有利于坡地扁平，并为实行等高带状间作或等高沟垄耕作打下基础。

2.2.4 修建梯田

修建梯田在丘陵沟壑地区，田面坡度较大，收到较好的蓄水增墒效果。我国黄土丘陵区坡耕地年径流量每公顷约为 225～450m³（折合 22.5～45mm），年土壤侵蚀量每公顷 45000～180000kg（约折合 4～16mm 厚的黄土层）。所以缺雨时农田干旱形成“无雨苗不长”；雨季来了又多暴雨，水土流失严重，又形成“下雨流黄汤”的景象。修成水平梯田后，就可拦蓄较大的暴雨，做到水不出田，土不下坡。据定西地区水保站测定，1963 年 6 月 4 日一次降雨 101mm，降雨强度达每小时 23.1mm。坡地每公顷径流量 360～375m³（相当 36～37.5mm），土壤冲刷量3.8～8.3t；而水平梯田就地渗透，没有发生水土流失，土壤含水量一般较坡地高 6%～11%，在大旱的情况下高 20%～60%。据甘肃定西大坪生产队 1975 年 3 月 8 日春小麦播前测定，水平梯田 0～30cm 土壤含水量 16.7%，而坡地仅为 13.4%。春小麦的亩产，梯田为 204.5kg 而坡地为 99kg。由此可见，兴修梯田（尤其是水平梯田）是坡地蓄墒、增产的有效途径。根据修造的方法和地面形式的不同，梯田一般又分为水平梯田、坡式梯田、隔坡梯田、反坡梯田等几种类型。由于修造梯田地坎

的材料不同，又可分为石坎梯田与土坎梯田。兴修水平梯田最重要的是严格保留活土层，应采取“里切外垫，生土搬家，死土深翻，活土还原”的办法，严格保留活土层，才能使土壤肥力受到的影响达最小限度。表 2-1 为定西县大坪生产队新修梯田保留表土与不保留表土的养分测定及产量情况。

表 2-1　新修梯田保留表土与不保留表土的情况对比

处　理	有机质/%	全氮/%	水稳性团粒/%	马铃薯产量/(kg/hm²)	备注
保留表土	0.855	0.0755	2.705	12000	0～20cm 耕层取样
不保留表土	0.794	0.0675	1.565	7410	
相对差/%	7.7	11.8	73	61.9	

由此可见，新修梯田过程中注意保留表层熟土，配合增施有机肥料，能做到肥力有所提高，当年增产。如上表所列，保留表土的比不保留表土的增产 61.9%，比坡地增产 40%。

2.2.5　等高垄沟耕种法

2.2.5.1　山地水平沟种植法

山地水平沟种植法主要适用于 25°以下的坡耕地。可以种植小麦、谷糜、马铃薯等多种作物。山地水平沟种植法的特点是播种是沿坡地等高线开沟，紧接着施入底肥，然后用耩子冲沟，使土肥拌匀。行距根据坡度大小而定，陡坡地自上而下，行距 50～60cm，缓坡地自下而上，行距 40cm 随开沟随下籽，小粒种子点入沟内半坡上，马铃薯等大粒种子，可播入沟底，采用通行条播，然后用犁再耕一犁进行复土并及时镇压。复土深度以不超过 6～7cm 为宜。覆土后要做到沟垄明显、无土块、无露籽。播种第二行时，要先空一犁的宽度不耕。再如上法播种第二行，中耕时，结合培土使原来的沟改为垄，原来的垄改为沟，以达到拦泥蓄水的目的。山地水平沟种植，过去也曾为套犁沟播，近些年在延安地区推广面积较大，对山地增产稳产起到了显著作用。

山地水平沟种植法的优点主要是表现在：一是可以在较陡的坡地上进行；二是因为犁沟较深，播下的种子可以接触湿土，容易出苗；三是沟、垄相间可以起到蓄水拦泥、保土增肥作用，减少土壤冲刷 23%～85%以上；四是增产明显，增加产量 20%～60%。

2.2.5.2　垄作区田

垄作区田是一种在坡地上有效的蓄水保土增产的耕作方法。在播种时，先从坡地下边开始沿水平等高线开犁，向下翻土，将肥料和种子均匀地播在犁沟的半坡上，接着回犁盖土；然后空一犁再耕一犁，如此往返操作。空犁之处，翻土成垄；犁过之处，则成为沟。中耕培土时，再将土壅到作物行间，使原来的沟又变成了垄，原来的垄则变成了沟。为了避免集水冲毁沟垄，应在各条沟中每隔 1～2cm，筑一个稍低于垄的横土挡，即成为垄作区田。据绥德水土保持试验站的观测，在同

样降雨的情况下，垄作区田比当地群众传统耕作法减少径流量77%，减少土壤冲刷量88%，可使洋芋增产3%～21%，谷子增产77%。但垄作区田不便于进行耙耱保墒，苗期表土蒸发量较大，一般只适于20°以下的坡地和年雨量在300mm以上的地区。应特别注意保墒工作，播种后应进行打土块、镇压等，以利出苗，为正常生长创造良好的基础。

2.2.5.3 平播起垄

平播起垄又叫中耕培垄，适宜于20°以下坡耕地。它是采取等高条播的播种方法，出苗后结合中耕除草，在作物根部培土起垄，以便拦水保土增加产量。具体做法是在播种时采取隔犁条播，行距一般为50～60cm，播后进行镇压，在雨季前结合中耕在作物根部培土成垄，并每隔1～2cm作一个土档，以防止横向发生径流。据榆林市试验结果，在同样雨量的情况下，土壤冲刷可减少95.9%，使谷子、马铃薯等增产30%左右。

2.2.6 蓄水聚肥改土耕作法

蓄水聚肥改土耕作法（抗干旱丰产沟）的主要特点是进行蓄水聚肥改土耕作时，先将有机肥料和用作底肥的化肥，均匀撒到地表；然后在地边内先空30～40cm的空带，再于空带的内侧沿水平等高线将30～40cm宽的表土翻到田块内侧，于表土下再取30cm深的生土，放在外侧预留的30～40cm宽的条带上，以形成地边埂，沟内底土再深翻一铁锨，然后将原来放置在内侧的第一条带的表土，及其下面的第二条带的生土（表土已移入第一沟内）深翻一铁锨，再从其内30～40cm宽开出第三条带，同样将第三条带的表土移向里侧，将起生土掏出放在第二条带的生土上，形成第一生土垄。然后将放置在内侧的表土及第四条带的表土均移入第三条带的沟内，形成第二种植沟。如此依次挖沟培垄。

蓄水聚肥改土耕作法具有操作简便，增产效果显著的优点，在旱塬、梯田、坡地均有广泛地应用。完成一亩约需要10个人工，如采用人工和畜力相结合，则一牛七人每天约可完成0.1～0.13公顷，工效可提高50%～100%。据史观义等在山西省高石、中阳等县试验，在种植沟内播种高粱、玉米、冬小麦等农作物，生土垄上种豆科绿肥，增产效果一般在26.7%～31.1%之间，且具有极显著的蓄水、保土效果。在降雨量为330.7cm，坡度16°，坡长20m的情况下，蓄水聚肥改土耕作法比对照减少径流量91.6%，减少土壤冲刷量97.4%，此外还集中了表土，加厚了活土层，增加了有效养分，促进了生土熟化，增产效果也极显著，是旱地农业增产的一项有效措施。

2.2.7 川台地垄沟种植法

川台地垄沟种植法适用于川、台、原、坝地和水平梯田、捻地，大多用来种植玉米、高粱等高秆作物，也可用来种植马铃薯、谷子等。

川台地垄沟种植法具体方法是，根据地力和所播种的作物，首先确定垄距，一般在 70～90cm 左右。畜力开沟时要坚持垄距标准，划线开沟以保持行间平行和行距相等，机械开沟可用开沟犁进行。若用四铧犁开沟，可摘去中间两铧，一次开两沟，垄距 90cm，深 24～30cm。播种时，应趁墒施肥，随开沟随施肥、随用耩子冲沟播种。如暂时不种，必须随即盖 3～6cm 厚的湿土，保持土壤墒情。在作物生长过程中结合追肥培土，进行倒壕，换垄，沟、垄位置互换，以防作物倒伏。

川台地垄沟种植法在旱区增产十分显著，其原因主要在于沟种能将种子播在湿土中，便于萌发成苗；沟内避风，有利于保墒防旱；遇雨降水集于沟内，有利于根系吸收；沟垄互换，有利于生地熟化及抗风防倒。在半干旱地区采用垄沟种植法，产量往往倍增。据在延安地区推广的经验，采用垄沟种植法的春玉米，亩产可达 500kg 以上。川台地垄沟种植法在旱地农业中具有重要的意义。

2.2.8　少耕免耕技术

少耕免耕技术是近 40 年来发展起来的新型耕作方法。传统耕作方法虽然在世界各地被广泛采用，且有促进土壤熟化，抑制田间杂草和病虫害等优点，但随耕作次数积累，且机械耕作耕层较稳定，影响了土壤蓄水能力和作物根系的生长。在旱地易失墒，而多雨湿润地区易蓄水成渍，使土壤盐碱化；传统耕作耕层土壤疏松，破坏了团粒结构，通透性好，加速了有机质分解，且地面裸露，造成水土流失和风蚀，不适合干旱地区节水灌溉；此外，耕作次数多耗能耗工，增加了生产成本。

2.2.8.1　少耕免耕特点及作用

少耕免耕法是相对传统耕作次数较多而言。从尽量减少耕作次数发展到一定时限内免除一切耕作，用特定的免耕播种机具一次完成灭茬、松土、开沟、播种、施肥、撒药、覆土、镇压等作业，此后在作物全生育期内仅用除草剂抑制杂草，不再进行任何田间作业，直至收获，这种耕作方法称少耕免耕法。其耕作程序决定了其特点如下。

① 有覆盖物　上茬作物收获后直接用免耕播种机进行播种，残茬通常由机械自动切碎还田作覆盖物。有的地方还有秸秆、沙石等覆盖物。

② 用免耕播种机播种保持了土壤层自然结构和水稳性团粒结构，降低了土壤通透性，使好气性微生物活动减弱，从而减缓了土壤有机质分化，改善了土壤理化性状。采用联合作业的免耕播种机一次完成播种、施肥、施药、覆土、镇压作业。

③ 化学除草剂的使用使杂草量逐年减少，覆盖使抑制作用得以加强。

少耕免耕法在生产上的广泛应用，必将取得明显的社会、生态、经济效益。王�等研究结果表明，3 年免耕覆盖与常规耕作相比，0～10cm 的土壤容重增加 0.04g/cm^3，总孔隙度下降 2%～6%，0～20cm 的土层有机质增加 2.7g/kg，速效

养分明显增加，土壤微生物数量增加，真菌、放线菌和固氮菌分别增加 141.90%、47.8%和 19.8%，农田生态环境有了较大改观。20 世纪 80 年代初期，吉林省农科院等单位大面积的试验结果表明：在东北中部松辽平原中等地力水平的黑土和淤土上，在头年深翻基础上无论玉米茬或大豆茬进行耙茬播种，都要比常规翻耕播种平均增产粮、豆 3.35%，每公顷机耕费节省 19.5 元，节油 17.3kg。此外，少耕免耕法在减少地面蒸发，降低水土流失，保土节水、防治沙尘天气方面均有重要作用。

2.2.8.2 少耕免耕技术体系

目前，少耕免耕法主要有垄作少耕法、轮翻少耕法、深松少耕法、耙茬少耕法、免中耕少耕法、铁茬播种、秸秆覆盖免耕法、沙田免耕法。它们的技术原理基本相近，其关键是依靠生物的作用进行耕作，保持土壤原有层次结构。传统耕法是用机械物理的办法来改变土壤的构造状况，免耕法则是依靠生物的作用来达到这个目的。采用免耕法能保持作物老根遗留给土壤大小不同的根孔和蚯蚓一类小动物活动遗留在土壤的洞穴。在适宜免耕的条件下，这些地下渠道不会被深翻或深耕所截断或破坏。因而在接近地表形成一个结构良好、孔隙度高的土层，并随着免耕的连续，在每次种植中，都将有新的根系穿插，在根系穿插过程中累积有机物质。并借助微生物的帮助，可形成水稳性团粒结构。这样，可以保持一个不经耕翻，通透性较好的土体结构。在植物残体的覆盖下，潮湿土壤里蚯蚓的活动大量增加，它们可以把部分覆盖物翻入土中，蚯蚓本身就发挥了“生物犁”的作用，它们的排泄物就是很好的团粒。因此，可以说免耕法是用生物进行耕作的方法。

少耕免耕法只有因地制宜，结合土壤性质、地质、地貌，并采取相应技术措施，才能取得较好效果。覆盖是少耕免耕的重要组成部分。研究结果表明，覆盖是免耕增产的重要保障，免耕覆盖比免耕不覆盖平均增产 1695.0kg/hm²。因此，覆盖度直接影响少耕免耕效果。玉米免耕地一般覆盖量为 7500～1000kg/hm²，籽粒产量为 4500～7500kg/hm² 的玉米地，秸秆可就地覆盖。秋收后不耕翻不灭茬，将玉米秸秆顺垄割倒或压倒均匀铺于地面形成全覆盖，翌年播前将秸秆搂到垅背形成半覆盖。这种覆盖方式比常规耕作增产 29.2%。小麦覆盖量一般为 3000～4500kg/hm²。可全程覆盖亦可休闲期覆盖，全程覆盖效果最好，可平均增产 31.8%。

为保证少耕免耕效果，应根据主要田间杂草种类选择相应的除草剂，少耕免耕法播种前必须完全消灭再生杂草；作物出苗后，生长期长（短）的作物可选择长（速）效除草剂抑制杂草与幼苗争水、争肥、争光照；喷施时应结合当时天气状况及农田小气候状况，一般在雨前或雨后进行，苗期太阳炽热时少量喷施或傍晚降温后喷施，持续干旱一般不喷施。

随着科学技术进步，少耕免耕机具技术不断推陈出新，应根据当地旱地分布、地理状况及经济条件进行合理选择。

2.2.9 轮作及种植结构调整技术

耕作粗放是干旱地区作物低产的主要限制因子之一。除精耕细作外，改善种植结构，合理轮作倒茬，实行间作套种，可有效节水抗旱，提高作物产量。

每年在同一块土地上，进行某一作物生产的连作方式，虽然对设备的投入资本要求低、管理较单一，但连续种植残余生物量低的作物不利于保持水土，特别在干旱半干旱地区，极易形成地表径流。此外，连作易造成有害生物（杂草、虫害、病害）滋生、土壤水分失调、作物欠收危险大等。有害生物特别是杂草，在连作的农田中易形成适应性，而土壤水分和养分失调会造成作物产量不稳定。轮作是以维持地力为目的，把不同种类的作物按一定顺序，周而复始进行循环栽培的种植体系。轮作过程中，土壤中保留了较多的残余物，且休闲期大大缩短，保持了水土，防止土壤遭受风蚀和水蚀，提高了水分利用效率和土壤有机质含量，与豆科作物轮作效果尤为明显，可明显改善土壤理化性质；细菌、真菌、放线菌和蚯蚓数量明显增高；轮作还可抑制病虫害的发生，同一种类或同一科属的作物，均有其固有的病虫害，若实行连作，则受害程度明显增加，如番茄、烟草、马铃薯等的青枯病、瓜类蔓割病、大豆紫斑病等。一方面因为轮作作物对病菌有适应性或免疫能力；另一方面轮作造成不利于病菌生长的土壤环境，以抑制病害发生。线虫是田间主要的害虫，寄生作物种类多、危害大，且防除困难，寄主作物与非寄主作物的合理搭配可明显抑制虫害发生。不同作物生育特性不同，畦内光照强度也各异，根据作物生育特性合理搭配轮作，造成弱光照环境，作物与杂草非同步生长，从而抑制杂草。

合理轮作是干旱区重要的农田水分调控技术，干旱区降水量少，土壤库容量大，在半湿润偏旱区，轮作增加了复种指数，因而提高了农田水分循环，加之光热资源丰富，达到节水增产目的。选择轮作方式依据是上茬作物对水分的利用情况，因其直接对下茬作物产生影响，示例见表 2-2。

表 2-2　不同茬口麦田雨季 0～2m 土层土壤蓄水量

年份	土壤蓄水量/mm		
	豌豆茬麦田	油菜茬麦田	连作麦田
1987	51.1	53.3	22.2
1988	125.1	131.3	108.7
1989	68.2	—	85.8
平均	81.5	92.3	72.2

豌豆和油菜生育期耗水量少，雨季蓄墒量多，是小麦较好的前茬。各种轮作方式中，以小麦豌豆加谷子三年四熟轮作方式对自然降水利用效率最高，见表 2-3。因豌豆和油菜产量低，影响了周期总产量和水分利用效率。因此，在轮作休闲期间加一茬谷子，不失为干旱区较好的抗旱节水耕作技术。

表 2-3 不同轮作方式水分利用效率

轮作方式	轮作周期总产量 /(10^4kg/hm²)	/%	轮作周期总耗水量/mm	水分利用效率 /[kg/(hm²·mm)]	施肥水平 /(kg/hm²)
小麦、小麦＋谷子、豌豆	1.19	126.3	1724.7	6.90	(农家肥)75000＋(纯氮)8＋(纯氮)6
小麦、小麦、豌豆	0.80	85.1	1721.2	4.65	
小麦、小麦、油菜	0.72	76.5	1677.2	4.35	
小麦、小麦、小麦	0.94	100.0	1693.0	5.55	

2.3 旱地土壤的保水技术

为了抑制水分的蒸发，在农业生产中经常要因地制宜地灵活运用以下主要的耕作保墒措施。

2.3.1 耙耱保墒

耙耱保墒是通过耙耱土地而达到保墒的一种耕作措施。耙耱是耙地和耱地的总称。耙地是利用钉齿和圆盘耙在犁耕后、收获后、播种前和幼苗期常用的表土耕作措施之一；耱地是利用耱子进行的表土耕作措施之一。耙地和耱地常常联合进行，具有碎土、平地和轻度镇压土壤的作用，同时在表土形成一极薄的干土覆盖层，保墒效果特别明显。

伏深耕以后，在经常出现伏旱的地区，耕后应注意耙耱收墒、保墒。我国北方地区 7～9 月虽为雨季，降雨量较多，但此时也正值日照强烈的高温季节。根据西北农林科技大学的观测，在关中地区的夏季休闲田内，土壤的日平均蒸发量为 1.63～1.84mm/d。所以在 100 多天的夏闲期内，常损失水分 200mm 左右，几乎占同期降雨量的 1/2 或 2/3。根据大田试验结果，在伏耕后的夏闲期间，进行雨后耙地保墒或中耕保墒的田地比不进行保墒的田地，在 7 天内要减少蒸发损失水分 9.8mm。依次推算，在百天以上的夏闲期内可减少损失水分 100mm 以上，占蒸发水量的 1/2 左右。由此可见，夏闲期间虽属雨季，但对雨后的耙地或中耕保墒工作仍不可忽视。所以，农谚“犁地不耙耱，不如家中坐”，深刻地说明了在旱农地区耕翻以后耙耱保墒的重要意义。因为翻耕以后，土壤松土层加深，大孔隙增多，且湿土层翻至地表，土壤蒸发量急剧增大，往往造成严重失墒。尤其在秋深耕以后，因为雨季已过，气温尚高，土壤水分尚未冻结，耕后如不及时耙耱、碎土保墒，不但会引起土壤水分的严重损失，而且还在地面形成大量的干土块，如果冬、春无较大的雪雨将严重影响春播。

雨后土壤中的水分是以液态形式上移至地面汽化而蒸发的。蒸发面的位置初始位于地表，随着地面的不断干燥，蒸发面随之下移。但据长期的蒸发试验表明，在关中地区的田间，蒸发面位置一般不会低于 10cm，而主要在 5cm 以内。所以地表

数厘米厚的土层在降雨或灌水后，通过中耕或耙地如能迅速干燥，降低蒸发面的位置，将有利于保存土壤中的水分。一般在雨后 2～3 天地面出现花白时，及时进行耙地或中耕的保墒效果好，过早过迟均非适宜。夏季的雨后耙地不仅可切断毛管，降低蒸发面的位置，减少蒸发，而且还可以破除暴雨之后的板结，为纳蓄第二次降水创造有利条件。但入秋以后，耙地必须与耱地相结合，或横耙、直耙、斜耙交互进行，务求把土地耙透、耙平，形成“上虚下实”的耕作层，以免漏风跑墒，以防秋旱，并为秋播全苗创造良好的条件。

早春解冻土壤返浆期间，上层土壤的水分比较充足，也是耙地保墒的重要时期。在土地刚刚解冻达 3～4cm 深，土壤下层尚有冰凌，昼消夜冻时就可开始耙地，称为“顶凌耙耱”，以后随消随耙，反复纵横交错进行 2～3 次，能使地表形成一层疏松的干土层，切断毛管水的运行，以保持土壤水分。据原华北农业科学研究所的观测，连续 3 次进行顶凌耙地，10～60cm 深的土壤含水量比未耙地相对多 9%～28%。早春耙地不仅应在冬闲地上进行，在越冬后的冬小麦地上也可进行垂直于麦行的横耙，以收到耙地保墒，清除枯叶，刺激冬麦恢复生长之效。春季耙耱要掌握恰当的时期，根据当地情况合理安排。

2.3.2　镇压保墒及提墒

镇压是利用农用镇压机产生的机械压力压紧耕层及压碎土块的表土耕作措施。镇压具有平整土面、增加土壤和种子的接触，更主要的是将土壤下层的水分提升到上层，同时防止水分蒸发，即提墒和保墒的作用。

土壤湿度在毛细管破裂含水量以上时，水管的运动已基本停止。此时土壤水分的损失主要是在土壤内部汽化，通过较大孔隙向大气扩散而损失。这时进行镇压，压碎地面坷垃，阻塞较大的孔隙，封闭地面裂缝，便能减少土壤气态水向大气中的扩散，起到一定的保墒作用。同时，镇压也可使土粒紧密，促使土壤水分上升，起到提墒的作用，有利于种子的萌发。中国科学院原北京水土保持研究所进行的镇压对土壤水分影响的试验结果（见表 2-4）表明，镇压与未镇压对土壤各层含水量影响明显不同。

表 2-4　镇压与未镇压土壤墒情的比较

土壤	处理	干土层厚/cm	各土层含水量/%				
			干土层	干土层～10cm	10～20cm	20～40cm	40～60cm
黄土	镇压	2	2.9	14.5	16.4	17.8	17.4
	未压	5	3.6	14.0	15.4	15.9	15.1
二合土	镇压	6	3.9	16.6	18.1	17.0	—
	未压	8	3.4	13.3	15.1	16.7	15.5
黑土	镇压	3	7.0	19.7	20.2	23.6	20.1
	未压	6	5.4	16.4	19.8	20.4	22.3

据近年农业科研单位的研究，当10cm以内的土壤含水量，黏土地低于16%～18%，壤土地低于12%～16%时，或耕层过于虚松的田地，播前一周都宜于用石碌镇压（每平方厘米400～500g的压力）以压实耕层，对增加耕层水分，保证全苗及提高产量（表2-5和表2-6）均有一定的效果。

表2-5 镇压提墒的效果

处 理	土壤容重/(g/cm³)	土壤孔隙度/%	干土层/cm	0～10cm含水量/%
播前镇压	1.197	54.8	1.6	17.8
播前不镇压	1.137	57.0	3.6	14.6

表2-6 播前镇压对作物产量的影响

作物	处理	土壤容重/(g/cm³)		成穗/(10^4/hm^2)	产量/(kg/hm^2)	增产/%
		0～10cm	10～20cm			
小麦	不镇压	0.86	0.97	379.5	4626.6	—
	压一次	1.13	1.28	414.0	4885.5	5.6
	压二次	1.19	1.30	486.0	5250.0	13.5
谷子	不镇压	1.03	1.13	39.9	3600.0	—
	镇压	1.14	1.21	45.2	4275.0	18.8

根据山西省壶关县晋庄大队的观察，谷子播种后要镇压三次，即所谓的“三砘”。第一次是随播种时，随用砘子镇压，使种子与湿土密接，便于种子萌发；第二次是在出苗前1～2天，进行黄芽砘，使出苗整齐；第三次是在出苗后，幼苗长出2～3片叶子时，选择晴天下午，进行青苗砘，既能蹲苗提墒，又能适当控制地上部的生长，促进根系发育，使次生根增加16.8%，植株高度降低9.4%。经过播后这三次的镇压，可使谷子出苗整齐、苗粗苗壮，为高产打下良好基础。

镇压在应用时应注意：①冬季地面坷垃太多太大，容易透风跑墒，需要在土壤冻结后进行冬季镇压，压碎地面坷垃，使碎土比较严密地覆地面，以利于保墒和聚墒；②土壤耕翻的时间与播种期相距太近，耕层太松，影响播种、保墒和作物正常生育，需要镇压后再进行播种；③播前土壤表层干土层太厚，种子不宜发芽或发芽不好，需要进行播前或播后镇压提墒，以利种子发芽出土；④初春土壤解冻，经过冻融的冬麦幼苗有耸抬现象，分蘖节裸露，进行镇压可使土壤下沉，具有保墒、促进分蘖、防止倒伏等良好作用；⑤镇压一定要选择在地表干燥时进行，以免镇压后表土发生板结，压后还必须进行轻微的耙耱，使表面有一薄层虚土，以防止水分蒸发；⑥在沙性很大的土壤上不宜镇压，因为沙土压不实，反而会更松，在盐碱土或潮湿的黏重土壤上均不宜实施镇压。

2.3.3 中耕保墒

中耕是指作物生长期对土壤进行的耕作措施，如通常说的锄地、耪地、铲地、趟地等都属于中耕的范围。中耕的时期是作物从出苗至封垄期。由于降水、灌溉、

踩踏、机压等多种原因使表土板结或杂草丛生，严重影响作物的正常生长发育，这时必须进行中耕措施。中耕的作用在于疏松表土，切断毛管水的上升，减少水分蒸发；并能破除板结，改善土壤通气，增加降水渗入以纳蓄降雨；也便于提高地温，加速养分的转化，以利作物的生长发育；并且可以消灭杂草，减少水分、养料等非生产性的消耗。中耕结合培土更能防止倒伏，提高农作物的产量和质量。农谚"锄头底下有水也有火"充分说明了中耕对作物生长发育的影响，中耕既能蓄水保墒，又能提温降温。

在夏闲期间雨后中耕（雨后 2～3 天进行赤地中耕或耙耱）具有很好的保墒效果。根据西北农林科技大学的研究，当土壤含水量降低到田间持水量以下至 15%左右时，仍然有毛管水的上升移动。此时，中耕切断毛管必然能减少土壤蒸发的损失。在武功旱原地区，麦收后夏季土壤水分的蒸发损失是相当大的。一般年份约占同期降水量的一半以上，日平均蒸发量为 1.84～1.63mm，全部夏闲期内损失水分 180～200mm。此外，在作物生长期内的春季中耕，除了保墒以外，还有提高地温，促进作物生长及根系下伸的作用，可促进根系吸收利用下层土壤中的水分和养分。秋季作物行间的深中耕，会损失一部分表土层内的根系，防止作物的贪青晚熟，并能减少径流，增加纳蓄降水的能力，为下季作物创造良好的土壤水分条件。

2.3.4　覆盖保墒

覆盖是一种极有效的保墒措施。各种覆盖方式均有减少土壤蒸发的明显效果，但其对土壤综合因子及作物生长的影响，却因覆盖材料、覆盖时期以及覆盖厚度等而有所不同。

2.3.4.1　地面覆盖的保墒原理

地面覆盖是在土壤表面覆盖一层作物秸秆等植物废弃物或塑料薄膜、砂石、化学药剂等，以减少土壤水分蒸发、调节土壤温度等的农业措施。地面覆盖保墒技术在我国有着悠久的应用历史。据我国农业历史记载，早在公元 6 世纪中叶《齐民要术》中便有蔬莱地盖草越冬保温保湿技术。20 世纪 70 年代以来，随着工业的发展，各种覆盖材料应运而生，地膜、乳化沥青、土壤表面增温剂、水温上升剂、叶面保湿剂等使用非常广泛，秸秆、砂石、草、粪肥覆盖技术有了进一步深入研究，覆盖技术在抗旱生产中起着日益重要的作用。

地面覆盖使土壤与大气间存在一个降温的物理界面，覆盖材料将大部分热量反射回大气，从而降低了土壤蒸发，有效抑制了土壤蒸发率，涵养了土壤水分。河南省清丰示范区二年小麦秸秆覆盖还田试验表明，0～10cm 和 10～20cm 耕作层土壤含水量随小麦秸秆覆盖量增加而明显提高，但对犁底层以下（大于 20cm）影响不大。覆盖量分别为 2250kg/hm^2、3750kg/hm^2 和 5250kg/hm^2 时，0～10cm 土壤含水量比不覆盖分别平均增加 6.14%、19.09%和 12.50%；10～20cm 分别增加 3.37%、3.69%和 7.15%。秸秆覆盖比不覆盖麦田棵间蒸发平均减少 64mm，节水

600～900m^3/hm^2，玉米田平均减少 56mm，节水 555～675m^3/hm^2，约相当于总棵间蒸发量的 1/3。近年西北农林科技大学李立科的旱地高产试验结果表明，主要靠留高茬、少耕、麦草麦糠全程覆盖新技术，并施足有机肥、化肥（主要是磷肥而非单施氮肥）、降水保墒率可从原来的 5%～35%提高到 50%～65%，在年降水 600mm 条件下，小麦产量可达 6550kg/hm^2。因此，地面覆盖具有涵养土壤水分，增加土壤水库储水量，抑制土壤蒸发的重要作用。

覆盖使作物棵间蒸发大为降低，并改善了土壤理化性质，提高了土壤团聚体的水稳定性能，改善了土壤结构和固、液、气三相比例，从而促进了作物根系生长和吸水能力，地上减少蒸发，地下提高作物吸水能力。研究表明，地面覆盖可减少夏玉米生长期间总耗水量的 13%左右，相当于 1 次 52mm 的灌水量，有的高达 65.5mm，同时，覆盖提高了作物产量；旱地棉田冬季休闲进行二元覆盖（即宽行覆盖地膜、窄行覆盖小麦秸秆）可提高土壤含水量和棉花的耐旱性，增产皮棉 13.34%～23.06%。中国科学院栾城农业生态系统试验站 5 年覆盖试验表明，秸秆覆盖夏玉米平均产量为 5900kg/hm^2，比不覆盖增产 260kg/hm^2，水分利用效率提高 9.4%，达 17.76$kg/(hm^2 \cdot mm)$。全面地膜覆盖研究表明，全膜覆盖玉米比露地增产 2854.5kg/hm^2，增产 26.5%，小麦增产 800～1500kg/hm^2，增产 50%～80%。耗水量减少，作物产量提高，总体上提高了水分利用效率。

覆盖物通过太阳辐射、雨水和土壤微生物共同作用逐渐分解（普通塑料膜等难分解物除外），其碳源和能源进入土壤，改善了土壤生态环境，提高了土壤有机质含量特别是氮、磷及速效养分含量及腐殖质比例。土壤蔗糖酶是土壤生物活性的重要指标之一，主要参与高分子有机物的分解，酶促蔗糖水解为葡萄糖和果糖，改善土壤碳素营养状况。覆盖秸秆能激活土壤中蔗糖酶活性，激活土壤中的蔗糖进行水解，为有机物的分解提供能量，调节了土壤中碳氮比值，微生物活动加强，有机质积累增加，使土壤容重降低，增加了土壤孔隙度，从而提高了土壤蓄水保墒能力。麦田稻草覆盖研究表明，覆盖比裸地有机质含量、总孔隙度的分别增加 1.39g/kg、3.21%，容重降低 0.10g/m^3。另据报道，2 年连续覆盖可增加有机质 0.14%、腐殖质 0.27%、全氮 0.02%。此外，覆盖抑制土壤蒸发率，保蓄土壤水分，在盐碱土覆盖可有效脱盐，2 年连续覆盖田脱盐达 80%，3 年连续覆盖的轻度盐渍化土壤耕层含盐量由 0.2%降至 0.1%。

杂草与作物争水争肥，争光争空间，阻碍了作物生长，覆盖麦田可减少杂草 30%～84%。覆盖量为 3000kg/hm^2、4500kg/hm^2、6000kg/hm^2 和 7500kg/hm^2 时，每平方米杂草量分别较不覆盖减少 27.4%、53.42%、46.58%和 61.64%。

覆盖物阻止了大气与土壤温度直接交换，寒冷冬季覆盖可防止土壤温度散失，提高地温，减小昼夜变幅，有效地防止了冻害及“倒春寒”危害，降低死苗率，保证作物安全越冬，促进根系生长，地膜覆盖增温尤其明显；炎热夏季覆盖物可反射太阳辐射，近邻地面位置的覆盖物下空气流动非常小，有效地防止了土壤水分散失

和热量侵入地面，从而降低土温，有利于防御干热风危害，促进作物生长。据测定，冬季秸秆覆盖平均提高地温 0.5～2.0℃，夏季秸秆覆盖 5cm 地温比对照低 1.3～3.4℃。

2.3.4.2　地面覆盖的主要形式

（1）秸秆覆盖

秸秆覆盖改善了农田水分状况，农田覆盖一层秸秆，一方面可使土壤免受雨滴的直接冲击，保护表层土壤结构，防止地面板结，提高土壤的入渗能力和持水能力；另一方面可以切断蒸发表面与下层土壤的毛管联系，减弱土壤空气与大气之间的乱流交换强度，有效地抑制土壤蒸发（表 2-7）。据试验，冬前覆盖秸秆的麦田，冬小麦收获后 0～200cm 土层的土壤含水量比对照平均高 1.43%，其中 80cm 以下土层的土壤含水量比对照高 2.1%～2.3%；春玉米免耕秸秆覆盖，0～50cm 土层的土壤含水量比对照高 0.5%～4.0%，而且秸秆覆盖二年的土壤含水量又高于覆盖一年的。

表 2-7　秸秆覆盖对土壤蒸发的抑制作用

处　理	土壤蒸发量/mm		土壤蒸发抑制量/mm	土壤蒸发抑制率/%
	秸秆覆盖	对照		
冬麦夏闲期	39.7	107.9	68.2	63.2
秋田冬闲期	49.8	95.0	45.2	47.6
春麦田休闲期(封冻前)	92.4	127.4	35.0	27.5

秸秆覆盖提高了水分利用效率。由于生育期覆盖对棵间土壤蒸发有抑制作用，因此农田生理生态需水与对照有显著的差异。试验结果表明，覆盖农田的耗水特点是，棵间土壤蒸发量减少，叶面蒸腾量相应增加，其总耗水量与对照无明显差异，所以秸秆覆盖有促进蒸腾，提高水分利用效率的作用。据田间试验资料计算，覆盖麦田全生育期蒸腾量比对照增加 15%，春玉米田覆盖的比对照增加 10%；覆盖地小麦增产 867kg/hm^2，覆盖地玉米增产 20085.5kg/hm^2，水分利用效率分别提高 3kg/(mm·hm^2) 和 4.65kg/(mm·hm^2)。

秸秆覆盖方法应结合当地具体条件而定，我国干旱农业区秸秆丰富，大部分被用作燃料或白白烧毁，造成很大的浪费，有时还造成严重的损失。近年来，随着农业科研的深入，秸秆用于农田覆盖已被广大农业生产者接受，秸秆覆盖对蓄水保墒、培肥增产有重要作用，是干旱农业区既经济又实惠的农业生产技术。根据作物生长季节不同，覆盖可分为生长期覆盖、休闲期覆盖和周年覆盖等，一般一年一熟区多采用生长期覆盖（生育期覆盖）。

生育期覆盖是指在作物生长期内进行的覆盖。覆盖的时间和方法依作物而异。冬小麦田可在播种后（必须在出苗前）、冬前（小麦开始越冬后）和返青前覆盖，以冬前覆盖最好。每公顷覆盖量为 3750～4500kg。要求均匀但不阻碍作物生长，直至冬小麦收获。如要追肥，可在覆盖秸秆前每公顷耧施尿素 150kg 左右，并将

地面耱平。小麦成熟收获后秸秆翻压还田。

春播作物生育期覆盖的时间，玉米以拔节初期（小喇叭口）、大豆以分枝期为宜。覆盖秸秆前，结合中耕除草，每公顷追施尿素 75～150kg，然后用麦秸 4500kg 或粉碎的玉米秸 5250～6000kg，均匀地覆盖在棵间或行间。成熟收获后将秸秆翻压还田。生长期小麦秸秆覆盖棉田以 6750kg/hm² 最优，且蕾花期覆盖效果最佳，3 年平均棉花总产量比对照高 19%。

休闲期覆盖技术系指在农田休闲期间用作物秸秆覆盖，以纳雨蓄墒，改善土壤理化性状。通常有两种方式：夏季休闲期和冬季休闲期覆盖。夏季休闲期覆盖一般在北方一年一熟旱区较多采用，主要为秋播作物冬小麦等蓄集水分，提供良好的水分库容。夏季休闲期正值北方雨季（7～9 月），此期覆盖能有效抑制土壤蒸发，提高自然降水利用率。具体方法为：在上茬小麦收获后，及时浅耕灭茬，耙耱平整土地后将小麦秸秆铡碎成 3～5cm 或麦糠、落叶等覆盖在休闲地上，覆盖量视土壤肥力状况，一般 4500～7500kg/hm²，覆盖均匀，较严实。

周年覆盖技术系指全年内持续覆盖，以达到节水增产效果。冬小麦周年覆盖一般于农田夏闲初期耕作后进行，覆盖量为 3000～5000kg/hm²，于冬小麦播前翻压；播后至越冬前继续覆盖同量小麦秸秆直至收获。春玉米于上年玉米收获秋耕后，用 4500kg/hm² 左右玉米秸秆覆盖，翌年春播前整地或免耕时去掉覆盖物，播后再覆盖好，直至玉米收获。山东省在烟台、青岛、潍坊推广的地膜与麦糠相结合的周年覆盖技术，土壤水分蒸发抑制率可达 30%～80%，土壤理化性状明显改善，氮、磷、钾含量分别增加 5.88%、26.69%和 10.31%，小麦、花生、棉花分别增产 25.5%～40.8%、17.70%～26.08%、15.90%，取得了明显的经济效益。其具体做法为：雨季结束后秋种前，一次施足两季所需全部肥料，深耕整地，起高垄（垄高 15cm、垄距 90cm），整平喷除草剂后覆盖 90cm 宽的地膜，秋种时沟底播两行小麦（行距 15cm），播后盖 1.5cm 厚麦糠。小麦拔节后在垄地上打孔播种经济作物（两行花生或一行棉花），密度与纯种相仿。小麦收获时留高茬（10～20cm），收后灭茬盖沟，下一轮种植实行沟垄换茬轮作。

(2) 地膜覆盖

据不完全统计，目前全国地膜覆盖栽培面积达 1000 多万公顷，地膜覆盖栽培的作物共 60 多种，包括小麦、玉米、棉花、花生、甘薯、马铃薯、甜菜、烟草、向日葵等大田作物和蔬菜、瓜类、果树等园艺作物。地膜覆盖已成为旱地农业的一项突出增产技术。

地膜覆盖的抑蒸保墒作用明显，覆盖地膜切断了土壤水分同近地表层空气的水分交换通道，可有效地抑制土壤水分的蒸发，促使水分在表层土壤中聚集，因而具有明显保墒提墒作用。据测定，地膜覆盖棉田播种后 10 天，0～40cm 土层含水量比裸地棉田增加 12 个百分点；30 天时 0～50cm 土层失水量比裸地少 34.6%。

提高作物产量和水分利用效率。由于覆盖使农田生态条件改善，有利于出苗

早、全、匀、壮，促进作物地上部和根系发育，因而具有良好的节水增产效果。各地生产实践证明，地膜覆盖的作物一般比裸地增产 20%～50%，水分利用效率提高 30%～100%，高者可成倍增长（表 2-8）。

表 2-8　地膜覆盖栽培的节水增产效果

地　区	作　物	覆盖方式	增产/%	水分利用效率提高/%
山东旱地	冬小麦	前期覆盖	30～45	60～100.5
甘肃旱地	春小麦	全期覆盖	30～50	90～202.5
东北高寒地区	春玉米	全覆盖	66～100	67.5～112.5
北京	夏玉米	全覆盖	17～36	135～180
陕西黄土高原	小麦-玉米间套	冬前盖麦-春盖玉米	12～19	30～48
新疆	棉花(清种)	全覆盖	19～56	67.5～94.5
河南	棉花(套种)	棉垄覆盖	18～32	45～78

地膜覆盖的方式因当地的自然条件、作物种类、生产季节及栽培习惯而异。可根据覆盖位置、栽培方式等划分为若干类型。

行间覆盖是把地膜覆盖在作物行间。这种覆盖方式又分为隔行行间覆盖和每行行间覆盖两种。隔行行间覆盖是将作物行间按覆膜带与裸露带相间分布的方式安排，即每一个覆盖的行间，紧接着是一个裸露的行间；每行行间覆盖是在每个播种行的行间都覆盖一幅地膜。

根区覆盖是把地膜覆盖在作物根系分布的部位。此种覆盖方式又可分为单行根区覆盖和双行根区覆盖两种。单行根区覆盖是每一播种行覆盖一幅地膜；双行根区覆盖是一幅地膜覆盖两个播种行和一个行间。

平作覆盖方式不用筑垄做畦，直接将地膜覆盖在整好的土壤表面，膜两侧边 10～15cm 压埋在土床两侧的沟内。铺膜时只在土床两侧开出埋膜沟，不大量翻动土壤。生产上多采用膜内两侧平作双行播种，一般窄行 33～40cm，宽行 60～66cm，地膜覆盖在窄行的两行作物上。

畦作覆盖方式有平畦覆盖和高畦覆盖两种。我国南方地区多采用高畦覆盖，畦面中央部位稍高于畦面两侧，土床断面形状多为梯形和圆拱形，特殊要求的有“屋脊型”。用地膜把宽度小于膜宽 30～40cm 的高畦包封起来，膜两侧边分别压埋于畦两侧的沟内。畦上种植 2 行或多行作物。

垄作覆盖是我国北方地区多采用的覆盖垄作形式。生产上多为一垄上覆盖两行作物，也有垄作单行覆盖的。由于垄的高度不同，又可分为高垄双行覆盖和低垄双行覆盖。低垄双行覆盖一般采用宽窄行种植，在窄行上筑垄，垄高 6～10cm，垄宽 66～80cm，垄上覆盖薄膜，每垄上种 2 行作物，此方式适于雨量较少地区旱地和水源不足的灌溉地区应用；高垄双行覆盖的垄较高，约 16cm 左右，其他方面同于低垄双行覆盖，适于雨量较多的湿润地区、下湿地和水源充足的灌溉地区应用。

沟作覆盖包括平覆沟种和沟覆沟种两种方式。平覆沟种是在播种前开沟，沟深约 7cm，沟宽 12cm 左右，播种于沟内，然后把地膜覆盖在沟上，此方式适于半干

旱地区的旱作田或水源不足的灌溉田。沟覆沟种是在播种前起垄造沟，一般垄高约15cm左右，垄宽约65cm，两垄之间的沟底宽80cm左右，播种前在沟内灌水压碱，在沟内播种，然后在沟内覆盖地膜，此方式适于在有灌溉、排灌条件的盐碱地区应用。

（3）砂田保墒

在覆盖保墒措施中除残茬（或秸秆）覆盖与塑料薄膜覆盖之外，在我国西北干旱地区有一种用砂石覆盖的抗旱保墒增产措施。采用这种措施的田地称为石田或砂田，是我国西北干旱地区一种传统的抗旱保墒耕种方式。它的特点是把卵石、砾石与粗砂、细砂等铺在经过深耕、施肥、压平以后的田地上。耕种时，则应用一套特制的农具和耕种方法。据说，在清代初期砂田就已经出现，距今已有300多年的历史。我国砂田，目前主要分布在甘肃兰州市附近的县、市之内，面积大约有9万多公顷，此外，在青海、山西省区也有少量分布。

长期的生产实践证明：在西北地区年降水量200～400mm的条件下，覆盖石砂的砂田比无任何覆盖的土田有突出的抗旱、保墒、压碱、增产作用，并能使作物早熟、高产、优质，相对地还较为稳产。

砂田的铺砂厚度，因生产条件而不同。有灌溉条件的，所铺砂层较薄，一般仅4～6cm，称之为“水砂田”，主要分布在城市近郊，用来种植蔬菜和瓜果；无灌溉条件的，铺砂较厚，一般16～18cm，称之为“旱砂田”，主要用来种植春小麦、大麦、豌豆、亚麻、糜谷等农作物。砂田有一定的使用寿命（即有效时期），水砂田比较短，一般4～6年，但旱砂田的使用寿命一般却能达30～40年或更长一些。因此，习惯上又把水砂田铺砂以后的第1～2年，或旱砂田铺砂以后的头20年称为新砂田。新砂田的砂层内细土数量少，保墒增温效果好，增产明显。水砂田的第3～4年或旱砂田的第30年前后，称为中砂田。中砂田仍保持着一定的保墒增温和增产效果。水砂田在4年以后，旱砂田产量也逐渐降低，称之为老砂田，或砂的衰老。老砂田必须把原来的砂层清除出去，重新犁耕、施肥、压平和铺新的砂层，则称为砂田的更新。

砂田在铺砂以后，即不再进行翻耕，只用特制的松砂工具——耖。结合中耕除草每年把砂层松动三四次，不扰动砂层下的土壤。播种也要用特制的农具，即双腿播种耧或单腿播种耧把种子条播在砂层以下的土壤表层上，或将砂层按照穴播的穴位移开，把种子播在土里。前一种方法适用于旱砂田内农作物的播种，后一种方法适用于水砂田播种蔬菜或瓜果，新砂田种植作物，一般不施肥或只追施液体肥料或化肥。中砂田和老砂田补施有机肥的时候，则把田面划分为若干条带，首先一条隔一条地把砂层移开，施肥以后耕翻土地，把土壤和有机肥料混合均匀，经整平压实后，再把砂层重新盖好，称之为“喂粪”。

砂田虽然在铺砂、更新和喂粪等方面费工费时，但由于在蓄水保墒、压碱、增温和早熟、优质、增产等方面有突出的效果。当地群众仍然十分喜爱。根据甘肃省

农科院的观测研究，当地 3～10 月作物生长期内，地表 30cm 土壤的含水量，3 年的新砂田平均 12%，而同期无覆盖的土田仅为 8%，前者比后者相对高出 50%；中砂田含水量平均是 11%，也比同期土田的土壤含水量相对高出 28%。由于砂石的比热容小，升温快，3～9 月作物生长期内，新砂田的 20cm 出的土温比土田可高 2℃以上。能使春小麦早出苗 5～7 天，早成熟 10 天左右，一般砂田蔬菜也可提早上市 10～20 天。由此可见，砂石层的覆盖由于减少了暴雨对土壤的冲击，减少了径流，避免了土壤直接暴露阳光下和干燥的空气之中，使作物生长所需要的土壤水分、温度等条件有了明显的改善，从而砂田的作物产量和品质比土田有明显的提高。一般年份，砂田的粮食作物产量比土田高 1～3 倍，棉花产量高 50%～80%；干旱年份土田里的作物往往颗粒无收，而砂田却还有些收成。据分析，砂田春小麦的蛋白质含量比土田可相对提高 21%，甜瓜的含糖量可以达到 11%～13%，砂田里种出的蔬菜也特别肥嫩。可以说，砂田是我国西北干旱地区征服自然的一项创举，值得重视。

2.3.5 保水剂保墒

2.3.5.1 保水剂的类型和特性

保水剂又称吸水剂，是具有较强吸水性能的高分子材料，吸收水分的数量相当于本身重量的几十倍、几百倍甚至千倍。我国青海化工科研设计所在 1986 年研制成功了高效吸水剂，吸水速度快，吸水性能好，在干旱环境条件下，能将所含水分通过扩散缓慢渗出来，并具有反复吸水和失水的特性。目前，保水剂主要有淀粉类（其代表为淀粉-丙烯酸盐接枝体）、纤维素类（其代表为羧酸甲基纤维分子结合体）、聚合物类（其代表为聚丙烯盐分子结合体，乙烯醇丙烯酸盐聚合体，聚丙烯腈水解物等）。产品一般为直径 0.8mm 以下，白色或淡黄色粉末，加工后可成片状、纤维状和液状。含水量在 10%以下，水分散体成中性。

保水剂的基本特性有以下主要表现。①高吸水性，吸水速度 5 分钟内达最大吸水量的 80%以上，10 分钟后接近最大吸水量。国外各种通用的保水剂在无离子水中的吸水率为 290～590 倍，最高可达 5000 倍。我国北京化纤所研制的 SA 吸水率可达 350～590 倍。在 1%食盐中的吸水率，日本研制的一般为 30～50 倍；国产的 SA 保水剂为 49.0～56.2 倍。②保水性强，保水剂吸水后溶胀成水凝胶，与水分子的亲和力相当大，保水性强。据测定，所吸收的水分在加压情况下仍可保持10～100 天。③吸水、释放水的可逆性，保水剂吸水后缓慢释放水分，逐步收缩恢复原状后仍具有原来的吸水特性，可反复吸水、释放水，反复使用数月。

2.3.5.2 保水剂的保墒原理及作用

保水剂在土壤中保墒原理：一是有效地抑制土壤水分的物理蒸发，减少水分渗漏和地表径流，改善土壤水分条件。因而利于种子萌发和出苗，提高幼苗成活率。二是在土壤中掺入一定量的保水剂，由于吸水聚合物的吸水膨胀，使土壤体积增

大，可调节土壤三相组成，具有改良土壤物理性状的作用。对于保水力差的砂土或砂壤土，它可以增加土壤液相组成比例，提高持水力；对于结构不良的黏重土壤，则可提高孔隙率，增加气相组成，改善土壤通透性，为土壤微生物活动提供适宜的环境。三是保水剂加入土壤后，在保蓄水分的同时，也保持了土壤中可溶性养分，减少养分淋溶和挥发损失，提高肥料利用率。

我国研制生产的SA吸水树脂保水剂、科翰98保水剂及引进的TC保水剂，在内蒙古、新疆、山东、山西、陕西、河北、北京等地应用，增产率达10%～30%。中国农科院作物研究所用SA-2保水剂给甘薯苗根部涂层，成活率98%，比对照提高34%，增产30.5%。另据中国科学院河南化学研究所报道，1982年他们在陕县和汲县进行的飞机散播造林试验，1个月后调查表明，用保水剂混土造粒的林木种子保存率达66.1%，而未经处理的纯种子保存率仅15%；经保水剂处理的幼苗存活率为13.5%，每平方米成苗0.78株。

2.3.5.3　保水剂的应用方法

（1）包衣

一般用粒度在120目即0.125mm粒径以上的保水剂与营养物、农药和细土等混合制成种衣剂，其中保水剂的含量依作物和地区特点而定，一般为5%～20%，种衣剂再作拌种或丸衣化，可大大提高出苗率，使根系发达，壮苗，还能节水、省工和增产。该方法适于水稻、玉米、油菜、烤烟和花草。

（2）蘸根

将作物的根系浸泡于一定浓度的保水剂中，使水凝胶均匀附在幼苗或苗木的根系上，直接栽植或取出晾干，捆扎成捆后再栽植。一般用40目即0.18mm粒径的保水剂以水重的0.1%与水充分拌匀，吸水20min，把裸根苗浸泡其中30s后取出，用塑料包扎好根部，可防止根部干燥，延长萎蔫期，利于长途运输，成活率可提高15%～20%。一般用于树苗、花卉苗及菜苗的储存、移栽和运输，也可用于果树和林木等的繁殖插条。移植花木以占施入范围内干土重的0.1%为佳，施用时要与土壤充分混匀，同时要覆盖，以减少水分蒸发，最初一周要浇透水1～2次；有条件的地方，最好让保水剂吸水成饱和凝胶后，再与土充分混匀。若需施肥，则应先把饱和凝胶与土拌匀后再掺肥。

（3）拌种

将种子浸在一定浓度的保水剂溶液中，使种子表面形成薄膜外衣；另将保水剂与化肥、农药以及粉碎均匀过筛的腐殖土按质量分数1%配比掺和均匀；再将包过外衣的种子与混合好的土按1∶3的重量比在制丸机（小型搅拌机）中造粒。此法可使小粒种子大粒化，适于精量播种，常用于飞机播种造林、种草。保水剂用量一般采用种子重量的1%～3%较好。

（4）施于土壤

既可以地表散施、沟（穴）施，也可以地面喷施，但直接施入土壤中的方法在

当前经济条件下尚难做到。地面散施是在播种时或栽植前将保水剂直接撒于地表，使土壤表面形成一层覆盖的保水膜，以此来抑制土壤蒸发。地面散施一般用于铺设草皮或大面积直播栽植。铺设草皮时保水剂用量为 90kg/hm²，大田一般为 37.5kg/hm²。沟施是直接将种子和保水剂一同均匀地撒入种植沟内，然后覆土耙平。穴施是先将保水剂撒入穴内与土掺合，然后播种覆土。沟（穴）施保水剂用量一般为 22.5kg/hm²。地面喷施是将保水剂配成一定浓度的溶液，用喷雾器喷洒在地面，使之形成一层薄膜减少地面蒸发。此法在经济作物栽植及育苗中应用效果较好。配制保水剂的体积分数一般为 1%。

(5) 作育苗的培养基质

将保水剂按 0.3%～1%的重量浓度配制成水分散体倒入培养皿，厚度在 1.5～10cm 之间，可直接把种子置于凝胶液上，免去纱布、滤纸等垫料，整个发芽过程不再加水。若将保水剂与营养液按 0.5%～1%的重量浓度比例搅和均匀成为凝胶状，在与其他基质按 1∶1 混合，则可用于盆栽花卉、蔬菜、苗木等的工厂化育苗，保水保肥效果明显。

(6) 流体播种

先用浓度 10%的保水剂凝胶与发芽种子混合，再通过专门的流体播种机直接播种入土，多用于蔬菜催芽种子的播种，其对出苗的效果明显，该法是近年欧、美、日采用的一种新工艺。

2.3.6 抗蒸腾剂保墒

2.3.6.1 抗蒸腾剂的类型

据研究，作物根系吸收的水分，只有 1%作为作物的细胞组成部分，99%经由作物通过蒸腾进入大气。若采取有效措施抑制蒸腾，则干旱地区的水分紧张状况可大大减轻。美国研究指出，抗蒸腾剂可使土壤水分损耗减少 40%左右。

抗蒸腾剂可分为气孔开放抑制剂、薄膜型蒸腾抑制剂和反射型蒸腾剂三种类型。气孔开放抑制剂包括黄腐酸、甲草胺、整形素等；薄膜型蒸腾抑制剂包括乳胶、聚硅氧烷、石蜡等；反射型蒸腾抑制剂如高岭土、熟石灰粉等。

2.3.6.2 抗蒸腾剂的保墒机理

由中国科学院河南化学研究所以风化煤为原料研制成一种新型的植物生长调节剂——抗旱剂 1 号，化学成分是黄腐酸（FA），在全国二十多个省、市、自治区大面积推广使用，具有显著的抗旱增产作用。近年来生产上应用的旱地龙，其主要成分也是黄腐酸。其保墒机理主要表现在：一是控制气孔开度，降低蒸腾强度。河南省科学院生物研究所测定表明，用黄腐酸喷洒小麦叶片，蒸腾强度在 3～7 天内低于对照，9 天的总耗水量较对照减少 6.3%～13.7%。二是改善水分状况，提高作物抗旱能力。据测定，一方面，FA 拌种的小麦叶片含水量比对照增加 4.9%；另一方面，叶面喷施 FA，可有效地抑制气孔开放度，降低蒸腾，作物耗水量减少，

土壤水分消耗速度也相应减慢，土壤含水量比对照提高0.8%～1.3%，保墒效果较好。

由于黄腐酸对作物地上部和地下部的生长均有刺激作用，因而具有显著抗旱增产效应和改善农产品品质的作用。据西北农林科技大学在宁夏固原试验，采用FA拌种或叶面喷施，可使旱地春小麦增产21%～46.6%，胡麻增产5.2%～24.9%，马铃薯增产14.8%～15.1%。据甘肃敦煌国营农场试验，喷施FA可使甜瓜增产10.1%～25.4%，每亩增收甜瓜216.2～345.5kg，且糖分含量增加0.77%～1.47%。此外，大量研究表明，FA对多种微肥和农药有明显增效作用。

2.3.6.3 抗旱剂1号的应用方法

（1）拌种

抗旱剂的拌种用量因作物而异。密植作物如小麦，种子∶FA∶水＝50kg∶200g∶5kg，即FA用量为种子量的0.4%；稀植作物如玉米、瓜类，种子∶FA∶水＝50kg∶100g∶5kg，即FA用量为种子量的0.2%。拌种时，先按种子量的0.2%～0.4%称取抗旱剂1号，并溶解在适量的清水中，配制成浓度为2%～4%的棕黑色药液。然后将药液均匀地撒在种子上，搅拌均匀，随即堆闷2～4h便可直接播种。如不能及时播种，应将种子摊开晾干，待播。若与农药配用，则应先拌农药，后拌抗旱剂1号。但需注意，抗旱剂1号不能与碱性农药配用。

（2）喷施

喷施的抗旱剂用量，小麦、谷子、瓜类等为每亩40～50g；玉米、花生、甘薯等为每亩75～80g。稀释用水量可根据喷施机具确定，以小麦为例，采用背负式手压喷雾器，喷片孔径为1.2～1.5mm时，每亩用水量可减少为65～75L方能喷洒均匀；如换上孔径为0.75mm的弥雾喷片，用水量可减少为10L；如采用机动喷雾器，则用5L水即可。喷施时期以作物对水分敏感期为最佳，如小麦在孕穗期和灌浆初期，玉米在大喇叭口期。一般全生育期喷施1次即可，遇严重干旱时应间隔10天左右喷施2～3次。喷施时间应选择无风天上午10点以前或下午4点以后喷施，24h内遇雨重喷。

2.3.7 土面保墒增温剂保墒（土壤结构改良剂保墒）

2.3.7.1 土面保墒增温剂的理化特性

土面保墒增温剂是一种田间化学覆盖剂，又称液体覆盖膜。它是一种用高分子化学物质制成的乳状液，喷洒到土壤表面后，很快在地表形成一层覆盖膜，达到抑制土壤水分蒸发，提墒保墒，提高土壤含水量之目的。

土面保墒增温剂为细腻的膏状物，呈黄褐色（合成原料）或棕褐色（天然原料）。化学性质稳定，呈中性，pH值7～8；成膜物质有效含量20%，含水量70%。用一般硬水，能稀释10倍以上。室内成膜时间约1h，大田晴天半小时即可成膜，阴天时间要长一些。制剂膜可保持20～30天。

2.3.7.2　土面保墒增温剂的功效

（1）改良土壤结构

改良土壤结构是该剂的主要功能。将土壤结构改良剂与土壤混合，由于氢键和静电的作用，对电解质离子、有机分子、络合物等产生吸附，从而促使分散的土壤颗粒团聚起来，形成团粒，使过砂或过黏土壤的结构得到改善。

（2）抑制土壤水分蒸发，调节土壤墒情

将土壤结构改良剂的水溶液喷施地表，干燥后即可形成多分子层化学保护膜，既固结表土，又抑制土壤水分的地表蒸发。裸露土壤中的水分主要是通过地表蒸发而损失，作物生长周期中所消耗的水分约有 25%～50%即是土壤表面物理蒸发消耗的。地面喷洒土壤结构改良剂后，由于所形成保护膜的封闭阻隔作用而减少了水汽向大气的扩散。这种能力通常以蒸发抑制率来表示。土壤水分蒸发受到抑制，实质上就是土壤水分含量相对得到提高，是农田土壤在较长的时期内保持比较湿润的状态，达到保墒的效果。

（3）提高土壤温度

使用土面保墒增温剂后，使土壤的热容量和导热率有所增大，增温作用显著。土壤表面日增温在 5℃以上，即使是 20cm 深度日增温也在 2℃以上。可使春播作物提前播种，提早出苗。

（4）减少地表面盐分的积累

我国北方干旱、半干旱地区存在着大面积的盐渍土，危害着农作物的生长，影响着农业的持续增产。盐渍土土体的盐分有“随水而来，随水而去”的特点，与降水的季节规律联系起来，便形成因春季强烈蒸发土壤水分携带盐分在蒸发力和毛管力的作用下，沿毛细管上升到土壤表面，水分蒸发留下盐分聚积在地表，使作物受到盐害，夏季多量降水则可使盐分淋洗到下层。根据这一规律，在地表喷洒结构改良剂抑制土壤表面蒸发，使土壤中的水分向上的速度减慢，便能防止盐分在上层积累，从而改善了幼苗生长环境，对培育壮苗十分有利。

（5）防止土壤风蚀水蚀

使用药剂覆盖的土壤，可经受 8 级大风考验和日降雨 40mm 以上雨水的冲击，有效减轻了水土流失。国外大量试验表明，土面保墒增温剂应用于苗床或大田覆盖，都能使玉米、水稻、棉花、蔬菜、瓜果等作物提早成熟，提高产量和品质，增产率一般达 10%～30%。用于甘薯、林木、果树、花卉和蔬菜的育苗及移栽也有良好效果。

2.3.7.3　土面保墒增温剂的应用

（1）精细整地

喷洒前要将田块整平，尽可能压碎大土块，否则会影响剂膜的完整性。并在喷洒前浇足底墒水，施足底肥。

（2）配制乳液

每亩使用剂量为80～100kg，按成品重量比加5～6倍水稀释。稀释时，先将称好的成品加少量水稀释调匀，然后边搅拌边加水至5～6倍，配成乳液。

（3）适时喷洒

使用时间根据种子萌芽温度和播种时的天气确定。春播作物在正常播期之前10天左右使用，最好选在晴天上午喷洒。

（4）注意方法

乳剂喷洒前要用纱布或细筛过滤。喷洒工具可用农用喷雾器或果园喷雾器（高压），使用时可将前面螺杆去掉，直接用后面龙头开关来调节雾粒大小。喷洒前要均匀，否则膜厚度不匀，容易造成出苗不齐。

（5）喷后管理

一般喷剂后20～30天不灌水、不施肥。若后期需要浇水，宜采取小沟灌水，水层不上苗床，以延长剂膜增温保墒作用。

2.3.8 钙-赤合剂保墒

2.3.8.1 钙-赤合剂的保墒增产机理

中国科学院水土保持研究所试验发现，采用氯化钙和赤霉素混合处理作物种子，不仅能提高干旱条件下的出苗率，加速成苗，而且有利于抵御生长后期可能受到的干旱，增加产量，提高单位水量的生产效能，达到了节水、抗旱、增产的目的。

赤霉素有促进生长和代谢的作用。当二者配合使用，可发挥互补和叠加的效应。在水分条件较好时，钙对生长有轻度抑制作用，与赤霉素混合使用后，其抑制作用消除并对壮苗有利；在土壤干旱时，钙对原生质的保护作用，则有利于赤霉素充分发挥其促进生长的作用。因此，用钙-赤合剂拌种，无论在土壤水分条件较好或较差时，都有比较明显的增产节水效果。

盆栽试验证明，小麦、糜子用钙-赤合剂拌种，分别比对照增产20%和21.2%。在宁夏南部田间试验，钙-赤合剂拌种的春小麦，单产比对照平均增产19.9%；钙-赤合剂拌种的糜子，单产比对照平均增产22.6%。增产的原因是，经钙-赤合剂拌种后，出苗期提前2～3天，出苗率提高12%～14%，小穗数增加5%～10%，千粒重增加3%～8%。在大田示范推广中，中等干旱条件下，作物一般增产8%～15%。此外，钙-赤合剂还有明显的保墒节水作用。据盆栽试验，小麦和糜子经钙-赤合剂拌种，水分利用效率均优于对照。经钙-赤合剂拌种的小麦，生产1g籽粒耗水1.65kg，较对照节约用水7.8%；经钙-赤合剂拌种的糜子，生产1g籽粒耗水1.16kg，较对照节约用水7.9%。在大田生产条件下，经钙-赤合剂处理的小麦，水分利用效率可提高11%～15%。

2.3.8.2 钙-赤合剂的应用方法

（1）钙-赤合剂的配制

氯化钙 1kg 加水 200L，配成 0.5%的溶液。赤霉素 5g 用少许酒精或白酒溶解，溶解后加入已配制好的 200L 氯化钙溶液中，混合均匀。

（2）拌种比例

每 100kg 种子加钙-赤合剂 10kg。

（3）拌种方法

先将溶液按比例配好，慢慢倒入种子中，边加边搅拌，开始要多翻动几次，以免溶液流失，待溶液吸干不再流出时用塑料布或麻袋盖好。为了使溶液尽量渗入种子内部，需堆闷 6～12h，再摊开晾干。

（4）注意事项

用播种机播种，种子一定要晒干，否则会影响下种，若与化肥混合播种，更应避免化肥吸水变潮而影响下种。赤霉素溶液呈中性，故不能与碱性农药混用，配制溶液的水要求微酸性或中性水。

参 考 文 献

[1] 高茂盛，温晓霞，黄金辉等. 耕作方式和秸秆覆盖对渭北苹果园土壤保蓄水性能及酶活性的影响 [J]. 中国农业大学学报，2009，14（4）：91-97.

[2] 田媛，李凤民，刘效兰. 半干旱区不同垄沟集雨种植马铃薯模式对土壤蒸发的影响 [J]. 应用生态学报，2007，18（4）：795-800.

[3] Panigrahi B，Panda S N ，Mull R. Simulalion of water harvesting Potential in rain-fed　ricelands using water balance modell [J] . Agricultural Systems，2001，69：165-182.

[4] 王同朝，卫丽，王燕等. 垄作覆盖对夏玉米产量及生长相关生理参数的影响 [J]. 玉米科学，2007，15（4）：109-113.

[5] Zhou LiMin，Li FengMin，Jin ShengLi，et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affects oil water，soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research，2009，113：41-47.

[6] 丁瑞霞. 微集水种植条件下土壤水分调控效果及作物的生理生态效应 [D]. 杨凌：西北农林科技大学，2006.

[7] 魏永霞，张文娥，严昌荣. 保护性耕作技术对大豆光合特性、产量及水分利用效率的影响 [J]. 中国农村水利水电，2009（2）：66-69.

[8] HuangG B，Zhang R Z，et al . Conservation tillage effects on spring wheat and field pea in the western Loess Plateau China. Soil management for sustainability [C]// Proceeding of international soil tillage research organization 16th triennial conference，2003.

[9] Raper R L，Reeves D W. Reducing soil compaction with in-row subsoiling and controlled traffic [C]// Conservation tillage & sustainable farming. Beijing：China Agricultural Science and Technology Press，2004：69-78.

[10] 杨青，薛少平，朱瑞祥等. 陕西黄土高原旱作农田机械化降水高效利用技术体系的研究 [J]. 农业工程学报，2003，19（增刊）：49-50.

[11] 李友军，吴金芝，黄明等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响 [J]. 农业工程学报，2006，22（12）：44-48.

[12] 杜兵，邓健，李问盈等. 冬小麦保护性耕作法与传统耕作法的田间对比试验 [J]. 中国农业大学学报，2005，5（2）：55-58.

[13] 赵天武，黄高宝，轩春香等. 黄土高原旱地不同保护性耕作措施对马铃薯田土壤水温效应及产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究，2009，27（1）：101-108.

[14] 廖允成，韩思明，温晓霞. 黄土台原旱地小麦机械化保护性耕作栽培体系的水分及产量效应 [J]. 农业工程学报，2002，18（4）：68-71.

[15] 鲁向晖，隋艳艳，高鹏，王飞，穆兴民. 宁夏南部山区不同耕作方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究，2007，25（5）：35-39.

[16] 王俊，刘文兆，李凤民．半干旱区不同作物与苜蓿轮作对土壤水分恢复与肥力消耗的影响［J］．土壤学报，2007，44（1）：180-183.
[17] 吴天龙，马丽，隋鹏，高旺盛，陈源泉．太行山前平原不同轮作模式水资源利用效率评价［J］．中国农学通报，2008，24（5）：351-356.
[18] 山仑．旱地农业技术发展趋势［J］．中国农业科学，2002，35（7）：848-855.
[19] 李援农，范立科，樊惠芳等．地膜覆盖灌水对土壤水分变化及作物生长的影响．水土保持研究［J］．2002，9（2）：45-47.
[20] 李彩霞，周新国，强小嫚等．不同水分处理下液体地膜覆盖玉米田土壤环境与产量效应［J］．玉米科学，2010，18（3）：108-112.
[21] 池宝亮，黄学芳，张冬梅．微孔地膜覆盖玉米的纳雨通气效应分析［J］．应用生态学报，2006，17（4）：755-758.
[22] 周丽敏．黄土高原双垄覆膜和地槽集水技术对土壤水温、土壤养分及作物产量的影响［D］．兰州：兰州大学，2009.
[23] 黄占斌，万惠娥，邓西平等．保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应［J］．土壤侵蚀与水土保持学报，1999，5（4）：52-56.
[24] 潘伙川．抗旱保水剂在甘薯上的应用效果［J］．农产品加工：学刊，2006（3）：68-69.

第3章 保护性节水覆盖栽培技术

3.1 覆盖栽培技术

在旱地农田水分平衡中，降水是土壤水分的主要来源，而蒸发、蒸腾、径流、渗漏则是土壤水分的支出项，其中土壤蒸发是土壤水分损耗的主要方式之一。旱地农业蓄水与保墒密切联系，因此在尽可能地蓄住天然降水，使其转化为土壤水后，最主要的工作是把它保存在土壤中，并减少它的蒸发散失。在旱地农业生产中，保住土壤水分与蓄水是同等重要的一项技术。

研究和实践表明，采用适宜的耕作技术措施或在地面布设覆盖物，便可有效地抑制土壤蒸发。保住土壤水分、防止土壤蒸发的技术措施有传统的耕作保墒技术、农田覆盖技术、免耕深松留茬技术、化学保水技术等，而保持土壤水分，限制土壤蒸发较为理想的措施是农田覆盖技术。

农田覆盖技术是指在土壤表面设置一层覆盖物，对土壤和近地面环境进行调控的技术，一般叫做地面覆盖技术。就地面覆盖物料的材质来划分有砂石覆盖、塑料薄膜覆盖、秸秆覆盖等。各种覆盖物的地面覆盖均有减少土壤蒸发的明显效果，但由于覆盖物的材质不同，对土壤环境所产生的作用也不一样，对农作物生长发育也会产生不同影响。

覆盖栽培技术的优点主要表现在保蓄土壤水分、减少土壤蒸发量、增加土壤有机质含量、改善土壤理化性质，地膜覆盖和化学覆盖还有明显的增温提墒作用。集各种覆盖技术于一体，对旱地农业的发展有着重要的现实意义和深远的历史意义。

3.2 秸秆覆盖栽培技术

3.2.1 秸秆覆盖及其方法

秸秆覆盖是指利用农作物的秸秆、麦糠、有机肥料、残茬以及树叶等有机物，覆盖在土壤表面。地表覆盖秸秆等有机物，不仅能抑制土壤水分蒸发，减少地表径流，蓄水保墒，还能保温降温，保护土壤表层，改善土壤物理性状，培肥地力，抑制杂草和病虫害，提高水分利用率，促进农作物生长发育，最终达到获得稳产高产的目的。

表 3-1 不同覆盖材料对小麦个体生长和产量的影响（1989～1990 年）

覆盖材料	对照	麦秸	玉米秸	麦糠
单株分蘖/个	1.6	2.4	2.2	2.5
单株次生根/条	2.1	3.9	3.7	4.0
公顷穗数/万	486	496.5	504.9	516
穗粒数/粒	28.9	33.0	33.4	3.6
千粒重/g	34.9	34.6	34.6	34.7
不孕小穗/个	28.5	24	18	16.5
产量/(kg/hm²)	4131	4818	4950	4950
增产/(kg/hm²)	--	687	819	829.5
增产率/%	--	16.6	19.8	20.1

秸秆覆盖材料有碎麦秸、碎玉米秸、碎豆秸、麦糠等，试验和生产实践证明这些材料都有抑制蒸发、灭草、肥田、改善土壤物理性状等方面的作用。表 3-1 是以麦糠、麦秸、玉米秸 3 种材料覆盖麦田的试验结果，结果表明 3 种材料虽然在增产效果上有所差异，但差异不明显。因此覆盖材料可因地制宜，就地取材，上茬秸秆可直接返田，作为下茬农田覆盖材料。

秸秆覆盖量的多少对增产效果有一定影响。试验资料表明，覆盖材料为小麦秸秆，每公顷适宜覆盖量为 4500～6000kg；覆盖材料为玉米秸秆，则以每公顷 6000～7500kg 为宜。

在一年一熟地区，农田覆盖秸秆的时间可在作物成熟收获后覆盖，也可在作物生育期间覆盖。前者称为休闲期覆盖，后者称为生育期覆盖。麦田休闲期覆盖是在麦收后及时翻耕灭茬耙耱后，随即把秸秆均匀地覆盖在地面上。覆盖材料以麦糠或粉碎成 20cm 左右的麦秸为宜，覆盖量为 350～450kg/亩。小麦播种前 10～15 天把秸秆翻压还田，结合整地每亩深施尿素 30kg，磷肥 40kg 作底肥。麦田生育期秸秆覆盖的田块，耕作、播种与不覆盖的田块完全相同，覆盖秸秆的时间可在出苗前、冬前和返青前，覆盖量为 300～350kg/亩。在覆盖秸秆前，每亩追（增）施纯氮 2kg 以上，并把地面压平后，再把秸秆均匀地覆盖在地面上。等小麦成熟收获后，把秸秆翻压还田。

春播作物生育期秸秆覆盖可在常规耕作基础上，于春玉米拔节初期（小喇叭口期）、大豆分枝期把秸秆均匀地覆盖在行间和棵间。春玉米覆盖秸秆前应结合中耕除草，每亩追施纯氮 2～3kg。覆盖材料可用麦秸、麦糠，覆盖量为 300～350kg/亩，也可用粉碎成 3～5cm 长的玉米秸，覆盖量为 400～450kg/亩，等作物成熟收获后，把秸秆翻压还田。春玉米、春高粱也可采用免耕整秸秆半覆盖方式。这种覆盖方式是在秋收时把整株秸秆就地均匀地铺在地面上，不灭茬、不翻耕，覆盖量为 500～1000kg/亩。第二年春播时，按播种行把秸秆扒开，形成半覆盖的形式，并在播种行内每亩深施纯氮 8～10kg，P_2O_5 4～6kg 作底肥，一次施入，不追肥。播种后喷施除草剂。秸秆在地面覆盖 1～2 年后，再翻压还田。

在一年两熟地区，冬小麦生育期秸秆覆盖与上述相同，但秋收作物多采用免耕

秸秆覆盖。这种覆盖方式分冬小麦-夏玉米两季连续免耕秸秆覆盖和夏作一季免耕秸秆覆盖。两季免耕秸秆覆盖是在前作物收获后不翻耕，直接播种，播后喷除草剂，然后把前茬作物的秸秆均匀地覆盖在地面上，覆盖量为 300kg/亩左右。夏作一季免耕秸秆覆盖是冬小麦仍采用常规耕作种植，小麦收获后不翻耕，直接播种夏播作物（如夏玉米、夏大豆等），播后喷除草剂。夏作一季免耕秸秆覆盖的方法有两种：一种是把前作小麦的秸秆直接覆盖在地面上；另一种是在小麦收割时留高茬 20cm 左右，夏播作物贴茬播种，等夏播作物出苗后，结合中耕灭茬，把根茬均匀地覆盖在株间和行间。

3.2.2 秸秆覆盖对土壤含水量的影响

秸秆覆盖避免了雨滴对土壤表面直接冲击，并能阻碍径流，提高土壤渗水性，防止水土流失。根据试验研究，在 10°坡耕地上，每亩覆盖秸秆 300kg，30min 降水 15mm，降水下渗 7.6cm，而露地降水下渗 6.4cm。显然，秸秆覆盖增加了水分的入渗，增强土壤的蓄水量。同时由于秸秆覆盖的阻隔作用，明显减少土壤水分的蒸发，起到蓄水保墒的作用。据试验，麦田冬前覆盖秸秆，冬小麦收获后测定 0～200cm 土层的土壤含水量，秸秆覆盖比对照平均高 1.43%，其中 80cm 以下土层的土壤含水量比对照高 2.1%～2.3%（见表 3-2）；春玉米免耕秸秆覆盖，0～50cm 土层的土壤含水量，秸秆覆盖比对照高 0.5%～4.0%，而且秸秆覆盖二年的土壤含水量又高于覆盖一年的（见表 3-3）。

表 3-2　秸秆覆盖对麦田土壤含水量的影响　单位：%

土层/cm	0～20	20～40	40～60	60～80	80～100	100～120
秸秆覆盖	7.88	9.72	8.84	6.52	7.94	7.83
处理　对照	6.46	7.96	7.76	6.66	5.65	5.74
相差	1.42	1.76	1.17	－0.14	2.29	2.09

表 3-3　免耕秸秆覆盖对春玉米田土壤含水量的影响　单位：%

测定时间	处理	1989			1990		
		0～10cm	10～30cm	30～50cm	0～10cm	10～30cm	30～50cm
播种至出苗	覆盖二年				14.7	15.6	
	覆盖一年	11.4	11.8		14.2	14.0	
	对照	8.9	11.3		11.7	12.5	
拔节期	覆盖二年				11.8	12.1	
	覆盖一年	13.3	14.8		7.8	10.4	
	对照	9.4	11.7		7.9	9.1	
授粉期	覆盖二年				8.5	9.1	10.2
	覆盖一年	11.2	12.6	11.6	6.3	7.7	8.8
	对照	9.4	11.2	10.8	5.9	6.7	7.3
灌浆期	覆盖二年				9.6	9.6	8.7
	覆盖一年	15.5	15.1	12.7	7.9	8.7	8.5
	对照	13.3	13.6	12.6	7.4	8.0	7.6

在农田休闲期间，土壤蒸发是土壤水分散失的主要途径。因此，农田休闲期秸秆覆盖对土壤含水量的影响更为明显。据田间定位试验测定，麦田夏闲期秸秆覆盖，麦播前0～50cm土层的土壤含水量比对照高1.7%～2.3%，0～50cm、50～100cm、100～200cm土层的土壤储水量分别比对照多11.9mm、7.5mm和4.5mm；春玉米田冬闲期秸秆覆盖，春播前0～50cm土层的土壤含水量比对照高1.2%～4.5%，0～50cm、50～100cm和100～200cm土层的土壤储水量分别比对照多10.4mm、11.5mm和23.3mm（见表3-4）。

表3-4 农田休闲期秸秆覆盖对土壤含水量的影响

地段	处理	土壤含水量/%				土壤储水量/mm		
		0～5cm	5～10cm	10～30cm	30～50cm	0～50cm	50～100cm	100～200cm
冬季休闲田	秸秆覆盖	12.2	15.0	16.4	14.3	98.8	75.9	200.2
	对照	7.7	13.5	15.2	13.0	88.4	64.4	176.9
	相差	4.5	1.5	1.2	1.3	10.4	11.5	23.3
夏季休闲田	秸秆覆盖	16.6	18.3	18.7	19.0	116.3	126.5	244.4
	对照	14.5	16.0	16.7	17.3	104.4	119.0	239.9
	相差	2.1	2.3	2.0	1.7	11.9	7.5	4.5

3.2.3 秸秆覆盖对土壤温度的调控作用

实验资料表明（表3-5），秸秆覆盖层能大量吸收短波辐射，降低热量交换速率，使大部分热量吸收到秸秆内，不容易传导到土壤中，因而降低了地温，当夜间长波辐射大于短波辐射时，又因秸秆阻隔而返回土壤，所以又起到保温作用，这就是秸秆覆盖下的土壤温度偏低而又比较稳定的原因。利用这种特点，在农作物生长的高温季节进行秸秆覆盖就可以调节土壤温度。

表3-5 秸秆覆盖下地面热量变化

项　目	时间/h	露地		秸秆覆盖	
		辐射热	反辐射热	辐射热	反辐射热
辐射热/[J/(cm² · min)]	11	3.135	0.672	0.084	0.878
	14	3.135	0.878	0.084	1.045
	17	1.881	0.084	0.042	0.250
地表温度/℃	11	35		30	
	14	49		32	
	17	39		31	

3.2.4 秸秆覆盖对土壤湿度剖面的影响

由于秸秆覆盖使生长季节土壤上层温度降低，土壤蒸发减少，土壤水势下降，在土壤剖面内自下而上的水汽流随之增强，土壤水分向表层聚积，致使土壤湿度剖面发生较大的变化。据田间定位试验测定结果，冬小麦和春玉米生育期秸秆覆盖对

土壤水分状况的影响深度可达 200cm 以下土层。在秸秆覆盖下，麦田 190cm 以下土层的土壤含水量比对照低，190cm 以上土层比对照高，尤其是 100cm 土层比较明显。春玉米田是 170cm 以下土层秸秆覆盖的土壤含水量比对照低，170cm 以上土层比对照高，尤其是 70cm 以上土层比较明显。秸秆覆盖能明显地提高土壤表层的含水量，使表层土壤经常保持湿润状态，不仅对作物吸收利用土壤表层丰富的养分有利，而且对播种出苗，特别是在干旱年份对抗旱播种出苗非常有利（赵聚宝，1996）。

根据土壤含水量计算不同土层的储水量，则秸秆覆盖的“提墒”作用更为明显（见表 3-6）。

表 3-6 秸秆覆盖对不同土层储水量的影响

土层深度/cm	冬小麦播种期				春玉米拔节期			
	储水量/mm		比对照增加量/mm	占总增加量的/%	储水量/mm		比对照增加量/mm	占总增加量的/%
	覆盖	对照			覆盖	对照		
0～50	109.0	98.9	10.1	60.5	120.3	101.2	19.1	83.0
50～100	96.2	94.0	4.2	25.1	71.8	67.2	4.6	20.0
100～200	193.2	190.8	2.4	14.4	190.0	190.7	−0.7	−3.0
0～200	398.4	381.7	16.7	100.0	382.1	359.1	23.0	100.0

从表 3-6 可以看出，秸秆覆盖保蓄的水分主要是在 0～100cm 土层内，尤其是集中在 0～50cm 土层内。麦田休闲期秸秆覆盖，0～50cm 土层所增加的土壤储水量占总增加储水量的 60.5%；春玉米生育期秸秆覆盖，0～50cm 土层所增加的土壤储水量占总增加储水量的 83.0%。

3.2.5 秸秆覆盖对土壤的培肥作用

(1) 改良土壤结构

秸秆覆盖可以使农田土壤免受雨滴的直接撞击，保护表层土壤结构，减少细小土壤颗粒填充孔隙，防止土壤板结。因此农田连续多年秸秆覆盖后，土壤容重降低，孔隙度增加。据测量，农田连续覆盖秸秆两年后，耕层的土壤容重比对照降低 0.059～0.144g/cm^3，土壤孔隙度增加 3.98%～5.43%。0～10cm 土层的三相比（固相、液相、气相），秸秆覆盖的为 45∶45∶10，传统耕作的为 43∶48∶9。秸秆覆盖的总孔隙度为 55%～57%，大孔隙度为 10%～15%，水、气适中而稳定，有利于作物生长发育。而传统耕作的总孔隙度为 57%～61%，大孔隙度为 9%～20%，水、气变幅大，不利于作物生长发育。从耕层土壤剖面看，秸秆覆盖下的土壤疏松，透气性好，作物根系发达，而传统耕作的土壤较为紧实，作物根系生长较差。

(2) 增加土壤有机质和土壤养分

秸秆覆盖在地表，与土壤接触面积小，秸秆常处于风干状态，不利于土壤微生

物、土壤动物以及土壤酶的侵染，秸秆分解缓慢，有利于土壤有机质的积累。山西运城7月中旬测定，秸秆覆盖的土壤有机质不仅较露地提高3.9%～10.4%（表3-7），同时土壤表层速效性养分明显提高，0～5cm的土层内土壤速效性钾含量高达365.9mg/kg，较露地土壤增加385.4%（陈奇思，2002）。

表3-7 秸秆覆盖对土壤养分的影响 单位：mg/kg

处理	速效氮(N)		速效磷(P_2O_5)		速效钾(K_2O)		有机质/%		
	0～5cm	0～20cm	0～5cm	0～20cm	0～5cm	0～20cm	0～2cm	3～10cm	11～20cm
露地	76.0	82.4	20.4	21.4	197.3	166.8	2.66	2.30	2.05
秸秆覆盖	77.6	77.6	35.3	30.0	365.9	214.8	3.02	2.54	2.13

放射性^{32}P和^{14}C示踪试验结果，冬小麦生育期覆盖麦秸300kg/亩，连续覆盖两年以上，土壤全氮含量比不覆盖的增加10.90%，全磷增加8.91%，水解氮、速效磷和速效钾也分别增加40.97%、56.75%和114.20%。覆盖麦秸7～10天后，大豆株间二氧化碳浓度可由比对照的0.0419%增高到0.0546%。14天后又增高到0.0683%。株间CO_2浓度的增加，相应地促进了作物光合作用和碳水化合物的运转，以及磷素的吸收分配。

免耕秸秆覆盖对土壤养分也有明显影响。根据试验，与用同量秸秆翻压还田相比，连续两季免耕秸秆覆盖9年后，0～20cm土层的土壤全氮和碱解氮分别增加18.8%和17.5%，土壤全磷含量增加6.2%，速效磷含量增加26.1%～29.0%。夏作一季免耕秸秆覆盖连续3年后，土壤表层全氮和速效养分含量也有所增加，土壤养分供应水平也逐年提高。

3.2.6 秸秆覆盖的节水增产作用

由于秸秆覆盖有抑制土壤无效蒸发、改善农田供水条件的作用，而且秸秆覆盖还具有培肥地力、协调养分供应的作用。所以，在秸秆覆盖下，作物产量明显增加，耗水系数减小，水分利用效率提高（见表3-8）。

由表3-8可以看出，在旱作条件下，秸秆覆盖冬小麦每生产1kg经济产量平均约需耗水668kg，比对照节水16.7%，水分利用效率比对照提高0.11～0.20kg/(mm·亩)；秸秆覆盖春玉米每生产1kg经济产量平均约需耗水503kg，比对照节水15.5%，水分利用效率比对照提高0.15～0.31kg/(mm·亩)（赵聚宝，1996）。

在灌溉条件下，秸秆覆盖可以推迟灌溉期，减少灌溉次数，节约灌溉用水。据试验，冬小麦田冬前覆盖秸秆时，0～100cm土层的储水量，秸秆覆盖处理的比对照少30.7mm。在小麦拔节期同时各灌一水，灌水定额都是40m³/亩，由于秸秆覆盖的保墒作用，到抽穗前秸秆覆盖处理的耗水量比对照少40.3mm，0～100cm土层的储水量反而高于对照。此时对照的土壤水分已低于适宜土壤水分的下限，需要灌水，而秸秆覆盖处理的土壤水分还高于适宜土壤水分的下限，不需灌水。从抽穗

表 3-8　秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响

作物	年份	处理	产量/kg	耗水量/mm	水分利用效率/[kg/(mm·亩)]	耗水系数
冬小麦	1988～1989	秸秆覆盖	355.5	376.3	0.94	706
		对照	297.7	399.6	0.74	895
	1989～1990	秸秆覆盖	297.2	314.7	0.93	720
		对照	262.9	319.9	0.82	813
	1990～1991	秸秆覆盖	322.1	297.3	1.08	613
		对照	269.0	301.1	0.89	747
	1991～1992	秸秆覆盖	275.7	262.1	1.05	633
		对照	231.2	261.2	0.89	753
春玉米	1988	秸秆覆盖	709.9	401.8	1.76	377
		对照	576.0	396.4	1.45	459
	1989	秸秆覆盖	597.6	396.3	1.51	440
		对照	496.5	407.0	1.22	547
	1990	秸秆覆盖	435.7	404.1	1.08	620
		对照	380.1	406.7	0.93	713
	1991	秸秆覆盖	370.2	319.9	1.16	573
		对照	295.4	291.4	1.01	660

到收获，在降雨补充土壤水分的情况下，秸秆覆盖处理的只灌了一次灌浆水，土壤水分始终保持在适宜的范围内，而对照却灌了抽穗水和灌浆水，比秸秆覆盖处理的多耗水 52.1mm，收获时 0～100cm 土层的储水量还低于秸秆覆盖处理。这个结果充分说明，秸秆覆盖提高了土壤的蓄水、保水能力，有利于发挥土壤水库对作物供水的调节作用（赵聚宝，1996）。

灌溉农田采用秸秆覆盖措施还可使作物耗水量及其组成发生显著变化，节约灌溉用水（见表 3-9）。

表 3-9　秸秆覆盖对冬小麦耗水量及其组成的影响

处　理	总耗水量/(m^3/亩)	耗水量的组成					
		有效降水量		土壤供水量		灌溉水量	
		m^3/亩	%	m^3/亩	%	m^3/亩	%
不覆盖秸秆灌 5 水	374.0	167.1	44.7	26.9	7.2	180.0	48.1
覆盖秸秆灌 1 水	314.3	167.1	53.2	107.2	34.1	40.0	12.7

从表 3-9 可以看出，不覆盖秸秆的冬小麦全生育期灌 5 水，灌溉定额为 180m^3/亩，全生育期总耗水量为 374m^3/亩，其中灌溉水、生育期间的降水和土壤供水分别占总耗水量的 48.1%、44.7%和 7.2%；秸秆覆盖的冬小麦全生育期只灌

1水，灌溉定额为40m³/亩，全生育期总耗水量为314.3m³/亩，其中灌溉水、生育期间的降水和土壤供水分别占总耗水量的12.7%、53.2%和34.1%。冬小麦秸秆覆盖灌1水的处理，不仅耗水量比不覆盖秸秆灌5水的处理少59.7m³/亩，而且还节约灌溉用水140m³/亩，节水效应十分显著。从耗水量的组成来看，不覆盖秸秆全生育期灌5水的处理，冬小麦耗水以灌溉水为主，占总耗水量的48.1%，对土壤储水的利用量很小，对生育期间的降水也不能充分利用；覆盖秸秆灌1水的处理，冬小麦的耗水以利用生育期间的降水和播前土壤储水为主，对灌溉水的消耗很少，仅占总耗水量的12.7%（赵聚宝，1996）。

3.3 塑料薄膜覆盖技术

塑料薄膜又称地膜、农用膜或农膜。把塑料薄膜严密地覆盖在农田的地面上就称为地膜覆盖。地膜覆盖栽培技术是在20世纪50年代初期随着塑料工业的兴起而发展起来的。一些工业发达国家，如美国、日本、意大利、法国等从50年代开始试验和应用，20世纪60年代在蔬菜、果树、经济作物生产中大面积推广应用，获得了早熟、高产、优质的显著效果。我国在1979年开始在华北、东北、西北及长江流域部分地区进行试验、示范、推广，棉花、小麦、水稻、玉米、花生、烟草、甘薯、马铃薯、甜菜以及瓜果等应用塑料薄膜覆盖，获得了明显的增产效果。以后地膜覆盖在我国便飞速发展。截至目前，我国已是世界上地膜覆盖技术发展最快、应用面积最大的国家，并已逐渐形成了具有我国自己特点的地膜覆盖农业栽培技术体系。

农田塑料薄膜覆盖栽培的研究和大面积应用是我国栽培史上的一次重大变革，也是覆盖材料的一个飞跃性的进步，已经取得了巨大的经济效益和社会效益，而且正在不断地完善和发展。

3.3.1 地膜覆盖栽培的原理

3.3.1.1 地膜覆盖对土壤温度的调控作用

地膜覆盖地面以后，地表热量收支状况发生明显的变化。白天，太阳辐射透过地膜直接到达土壤表面，使土壤增温，地膜切断了地面与大气之间水、热交换通道，太阳辐射热滞留在膜内，使地温提高；在夜间，地膜有抑制地面长波辐射的作用，使土壤失热减少。而且地膜下水汽凝结，还会放出一部分潜热。总之，在地膜覆盖下，土壤白天蓄热多，夜间失热少，地温明显比露地高。据测定，覆膜麦田0cm、5cm、10cm、15cm、20cm耕层土壤温度分别比露地麦田增加2.8℃、1.9℃、1.9℃、1.8℃、1.7℃；覆膜麦田0cm、10cm、20cm土壤温度的日较差分别比露地减少6.2℃、2.0℃、0.4℃。温度增高和日较差减小，免除了越冬期小麦低温和冷冻的危害，有利于小麦安全越冬。在小麦返青期，覆膜麦田0cm、5cm、

10cm、15cm、20cm 土壤温度日较差比露地分别高 9.4℃、6.0℃、3.8℃、1.8℃和 0.2℃，在这一生育阶段温度增高有利于小麦生长发育，日较差增高有利于光合产物在体内的积累，为植株健壮生长打下良好的物质基础。

地膜覆盖栽培因地膜颜色厚度不同，对土壤温度的调控作用也不相同。山西农科院棉花所于 1982 年 4 月 15～20 日测定，浅紫色膜土壤增温值最大，10cm 较露地土壤提高 3.3～4.6℃；无色透明膜增温次之，为 3.3～3.5℃；深紫色膜增温为 2.9～3.4℃；乳白色膜增温为 1.3～1.8℃。

地膜的厚度不同，也能对土壤增温效应产生不同的影响。一般情况下，在一定的温度范围内，地膜厚度与土壤增温值呈正相关趋势，随着地膜厚度的减小，增温效应相应降低。我国的地膜从开始的 0.014mm，逐渐减薄至 0.008mm，从应用实际情况看，还有继续减薄的趋势。

地膜覆盖的增温效应，除了决定于地膜的自身特性外，还与地理位置、纬度、海拔、土壤湿度、种植行距、覆盖度等因素有关。从各地的观测资料看，不同地区春季覆膜的增温效应有明显差异。如湖南地区（北纬 27°）土壤增温值为 3.3°左右。山西（北纬 35°）土壤增温值为 2.4～3.7℃。新疆棉区（北纬 43°）土壤增温值为 3～4.6℃，辽宁地区 5cm 处地温增值为 1.4～3.8℃，最高日增值可达 5.3～8℃。土壤增温值因土壤类型、作物生育时期而异。据中国农科院棉花研究所试验，淤沙土、沙土壤及轻沙壤土地膜覆盖，5～10cm 深日均地温分别比露地高 3℃、3.3℃和 4.3℃。另据研究，在玉米地地膜覆盖苗期平均日增温 3.9℃，拔节期日增温 3.3℃，抽雄期日增温 1.3℃，灌浆期日增温 1.1℃，全生育期平均日增温 2.4℃，共增有效积温 307.8～389.4℃。有些作物的生育中后期，由于植株生长旺盛，遮盖地面，此时覆盖不仅不增温，反而会比露地降温 1℃左右。

3.3.1.2　地膜覆盖对土壤水分的调控作用

在我国北方旱区，在旱作条件下，如果地下水埋藏深度在 3～4m 以下，土壤水分主要来源于降水，土壤失水的途径主要是土壤蒸发和作物蒸腾。地膜覆盖地面以后切断了土壤蒸发面与大气之间的水分交换通道，土壤水分只能在地表与地膜之间的狭小空间内不断地蒸发、凝结并附着地膜的下表面，不断地落到膜内的土壤上，渗入土壤耕层。土壤水分就这样在膜下不断地蒸发-凝结-降落，循环不已。与此同时，土壤深层的水分，在土壤水势梯度的作用下不断上移到表层，并参与膜下的水分循环，促使土壤水分不断地聚集在土壤表层。因此，地膜覆盖具有明显的保墒提墒作用。据模拟试验，露地土壤水分蒸发速度最快阶段出现在最初 6h 之内（8 月中旬），每小时以减少土重的 2.63%的速度散失，此阶段累积蒸发量高达持水量的 70%，而地膜覆盖（覆盖度 90%）的土壤，不出现高速蒸发阶段，仅以平缓的低速度蒸发，16h 土壤含水量仍高达 20.2%，而露地土壤水分仅 4.7%。据山西棉花所的试验资料，沟种覆膜比平地覆膜根区 20cm 处，土壤水分提高 2.3%，比露

地提高 4.6%（见表 3-10）。

表 3-10 不同覆盖方式土壤水分变化 单位：%

处 理	5月2日	5月17日	5月31日	6月16日	平均
露地	10.4	11.8	12.5	11.1	11.5
平地覆膜	11.2	15.0	13.4	13.1	13.2
沟种覆膜	15.9	17.5	15.5	15.4	16.1

另据孙本普连续两年的试验资料，冬前 0～5cm 土壤含水量覆盖麦田比露地增加 2.7%～10.7%；0～20cm 土壤含水量，覆盖麦田比露地增加 1.4%～7.2%（表 3-11）。

表 3-11 地膜覆盖对土壤含水量的影响 单位：%

取样时间		取样深度											
		0～5cm						0～20cm					
		平均	冬前最小差异组	最大差异组	平均	揭膜最小差异组	最大差异组	平均	冬前最小差异组	最大差异组	平均	揭膜最小差异组	最大差异组
处理	盖膜	21.1	21.1	20.1	18.8	17.4	20.6	22.4	22.4	20.5	19.4	19.4	18.3
	露地	16.0	18.4	9.4	15.9	19.2	14.0	18.5	21.0	13.2	18.1	19.1	16.1
比露地增减		+5.1	+2.7	+10.7	+2.8	−1.8	+6.6	+3.9	+1.4	+7.2	+1.3	+0.3	+2.3

由于地膜覆盖栽培能有效地抑制土壤水分无效蒸发，保墒效果十分明显。据中国农科院气象所在 1985 年 5 月无雨时段内的试验，春玉米地膜覆盖区 0～5cm 耕层土壤含水量由 15.8%下降到 15.1%，仅减少 0.7%，而露地由 30.5%下降到 18.1%，减少高达 12.4%。从图 3-1 可见，玉米全生育期和各生育阶段，地膜覆盖地农田蒸散量都比露地低，其中苗期差异最为明显，相差 30%左右，抑蒸保墒效果促进了土壤水分的有效循环，覆盖耕作层不同深度土壤含水量明显高于对照（见表 3-12），上层大于下层，前期大于后期（胡芬，1996）。

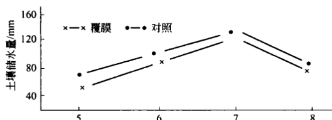


图 3-1 覆膜区与露地区玉米蒸散量动态变化

表 3-12 玉米覆盖栽培对耕层土壤水分的影响 单位：%

观测日期		土壤深度					备注
		0～5cm	5～10cm	10～20cm	20～30cm	30～40cm	
4月22日	覆膜	15.5	14.8	14.2	13.1	9.7	播种期
	对照	8.6	9.7	10.6	10.1	8.5	
	增值	6.9	5.1	3.6	3.1	1.2	
5月10日	覆膜	12.6	13.0	12.5	12.3	12.4	三叶期
	对照	7.9	8.6	8.3	9.9	10.3	
	增值	4.7	4.4	4.2	2.4	1.6	
6月9日	覆膜	7.9	10.0	12.3	12.9	13.0	拔节期
	对照	5.0	7.1	8.2	9.1	12.0	
	增值	2.9	2.9	4.1	3.8	1.0	
7月22日	覆膜	8.5	10.8	11.4	11.1	—	开花期
	对照	5.4	7.6	8.3	9.5	—	
	增值	3.1	3.2	3.1	1.6	—	

3.3.1.3 地膜覆盖对近地面光照环境的调控作用

由于农作物叶片相互遮荫，一般情况下下层叶片的光照条件较差。但地膜覆盖之后，由于地膜自身及其膜下水珠，对光有一定的反射能力，所以增加了近地面空间的光量，使植株尤其使下层叶片能获得较好的光照。据辽宁农科院测定，当棉株高5～6cm时，地面10cm处的反射光，地膜覆盖较未覆盖的高147%，30cm处高95%；棉株高10cm时，10cm处的反射光，地膜覆盖较未覆盖的高75%；30cm处高33%。与此同时，气温也有所提高，苗期地上3cm处气温提高0.6～1℃，5cm处提高0.5℃。另据试验表明，玉米地膜覆盖100cm行距的光照强度比露地增加16.7%～33.3%；穗部的光照强度增加14.3%～27.7%。晴天中午距地面15cm高处普通透明膜的反射率为14%，而露地的反射率只有3.5%。

3.3.1.4 地膜覆盖对农田土壤营养的调控作用

地膜覆盖加速了土壤有机质及矿物质的分解，促进土壤养分向有效态转化。据田间试验测定，土壤养分的分解与消耗量随覆盖时间的延长而加大，有机质、碱解氮、有效磷和有效钾的分解释放与消耗量，其大小顺序为秋盖＞冬盖＞春盖＞不盖。据研究，地膜覆盖的土壤细菌数较露地的高42.9%～74.5%，真菌数提高25%～76.7%，放线菌数增加5.2%～70%。据施入土重2%的有机肥模拟试验，地膜覆盖100天后，土壤有机质含量较露地土壤下降了0.024%～0.089%。因此，地膜覆盖不仅加速了土壤有机质及矿物质的分解，同时还促进了土壤潜在腐殖质的矿化，为高产提供了矿质营养条件。

地膜覆盖增加了CO_2含量，地膜覆盖后，阻碍了土壤中CO_2向大气的扩散速度，使之在土壤的累积量增加，同时，由于覆盖下土壤水热状况的改善，使土壤中生物作用和非生物作用增强，从而使土壤中CO_2释放量和累积量增加。

采用原状土壤上直接吸收二氧化碳的方法，测定旱地覆膜后棉花在出苗前的土壤二氧化碳释放量，每日每 $100cm^2$ 面积上，覆盖的为 20.7mg，露地的仅 5.1mg，覆盖的比露地的高 405.9%。

地膜覆盖栽培能使土壤保持疏松状态，与未覆膜地相比，土壤孔隙度增加 1.6%～6.0%，容重下降 0.21～0.072g/cm^3。这种疏松的土壤有利于玉米生长发育，也有利于土壤微生物的活动，加速有机质分解，提高土壤肥力，为玉米根系的生长创造良好的生态条件。

3.3.2 地膜覆盖栽培的生物学效应

地膜覆盖的抑蒸保墒和增温效应明显地改善了麦田光、温、水、气、肥等生态条件，有利于培育壮苗，促进晚播麦的营养生长和分蘖的产生，每亩总穗数增加；覆盖期积温增加的补偿作用，使晚播麦的生殖生长提前，穗分化时间延长，有利于穗粒数的增加；抽穗开花期的提前，相对地延长了灌浆时间，对于躲避后期干热风等自然灾害，提高粒重也是十分有益的，这就是晚播小麦比同期播种的露地小麦增产的生物学原因。

地膜覆盖的玉米田，因土壤水分，热量状况适宜于种子萌发、出土和幼苗生长，一般情况下可比露地提早 5～7 天出苗，且苗齐而壮，每亩总茎数显著增加，约增 20%左右，为玉米增产奠定了基础。地膜覆盖栽培对玉米生长和发育都有明显促进作用。据黑龙江省海伦县的试验资料，苗龄一个月的覆膜玉米苗，与同期播种的对照苗相比，株高增加 12.6cm，茎基部粗增加 0.2cm，叶片增加 3 片，全株叶面积增加了 $47.3cm^2$，为积累更多的光合产物打下基础。地膜覆盖栽培对玉米生殖生长的促进也十分显著，表现为早拔节、早抽穗和早成熟，加速了生理过程，全生育期比露地玉米提前 4～6 天，使开花灌浆期与当地气温较高季节相吻合，从而避开秋霜的危害，这对于提高千粒重是十分有利的。

由于地膜覆盖栽培可有效地改善棉田的生态系统，为棉株的早生快发提供良好的环境条件，首先促进根系的生长，体积增大，侧根数量增加，扩大水分和营养的吸收面积，干物质积累增多；然后作用到地上部，使棉花株高增长，叶面积扩大，制造和积累更多的光合产物，促进棉株快发，生育速度加快，生育进程提前；最后使伏前桃、伏桃数量增多，亩铃数增加，铃重增高，从而使覆盖棉田达到高产优质。

由于生态环境的改善，烟叶在株高、茎粗、单株叶面积等方面均表现出明显的优势。6 月 15 日测定结果，麦草覆盖处理的株高为 33.0cm，麦草地膜覆盖处理的为 46.9cm，分别是对照的 2 倍和 2.84 倍；单株叶面积麦草覆盖处理的为 $2824.5cm^2$，麦草地膜覆盖处理的为 $4379.0cm^2$，分别是对照的 2.3 倍和 3.56 倍。此外，烤烟覆盖后生长发育速度加快，麦草地膜覆盖的比对照提前 10 天现蕾，麦草覆盖比对照早 7 天现蕾，采叶始期也分别比对照提早 11 天和 7 天。可见，覆盖

栽培可使烟叶提前成熟，避免后期阴雨低温对烤烟品质的不良影响（胡芬，1996）。

3.3.3　地膜覆盖栽培的增产效果

晚播小麦地膜覆盖栽培，是一项多效应的先进栽培技术，与同期播种的露地小麦比具有明显的增产效果。据山东惠民地区农科所 8 年的试验结果，覆盖栽培小麦平均亩产 362.2kg，比露地小麦每亩增产 115.6kg，增产率为 45.1%。地膜覆盖栽培对小麦产量组成也有明显影响，在基本苗相同情况下，每亩穗数增加，覆盖地比露地平均多 14.36 万个，每公顷增产 2244kg，增产率为 67.6%；在亩穗数相同的情况，穗粒数增加，覆盖膜的每穗粒数比露地平均增加 4.41 粒，每公顷产量平均增加 991.5kg，增产率为 22.4%。

玉米地膜覆盖栽培是玉米生产上一项新型的保护性栽培技术，它能明显地改善玉米地耕作层的生态环境，协调土壤中水、热、气、肥等作用，促进玉米生长发育，与同期播种露地玉米相比较增产效果十分显著。丘陵山区一般每公顷增产 1500～2250kg，增产率为 66%～100%；平坝地区一般每公顷增产 2400kg 左右，增产率 26.0%。

由于地膜覆盖棉花成铃多，产量和质量都相应提高。据新疆农科院经济作物研究所试验资料，覆盖地棉比露地棉平均增产皮棉 572.25kg/hm^2，增产幅度在 19.6%～56.7%。其中，以北疆效果最好，平均增产 100.5%；南疆次之，增产 48.2%；吐鲁番较差，只增产 11.6%。山西棉花研究所试验资料表明，不同覆盖方式下，棉花的耐旱性、增产潜力是不同的，沟种覆膜栽培棉花，既能早播防冻，又能保墒防旱，亩产皮棉明显高于沟种覆盖膜和平地覆膜栽培，亩增产率分别提高 16.4%～23.0%。

3.3.4　地膜覆盖栽培的方法

地膜覆盖栽培的方法因作物不同其方法也不同。以小麦和玉米为例。

3.3.4.1　全生育期地膜覆盖小麦（甘肃模式）栽培

（1）技术要点

小麦全生育期地膜覆盖穴播栽培技术，是在传统耕作的基础上，播种时平铺地膜，然后用小麦穴播机进行穴播的一种小麦高产高效栽培新技术，旱地、水地、冬麦区、春麦区均可应用。

（2）地块选择

穴播小麦选地很重要，如选地不当，将达不到地膜覆盖应有的增产效果和经济效益，甚至会减产。选地应注意：一是地面要求平整，特别是用穴播机进行播种时，要求更严格；二是要求土壤肥力中上等，因覆盖后，不便追肥，同时穴播小麦生长旺盛，产量高，养分消耗亦多，土壤肥力不足，易造成小麦中后期脱肥，叶片早衰，严重影响产量，甚至减产；三是沙土地和土层太浅的地块不宜种植穴播

小麦。

（3）精细整地

前作收获后，及时深耕收墒，耕后精细进行整地。播前整地质量的好坏决定着覆膜质量和覆膜的效果。整地要求做到地面无土包坑凹，无大的土块，无根茬，地表平整，土细土实，口墒好。

（4）重施底肥

无论水地或是旱地，一般要求结合播前整地，将所需农家肥及氮、磷、钾肥一次全部施入土壤。中等肥力地块，一般亩施农家肥 2500kg、纯氮 12kg、五氧化二磷 9kg，并适量补施钾肥。

（5）品种选择

因穴播小麦能明显增加穗粒数，并增加植株高度，故要选用中矮秆、抗病、抗倒、分蘖多、高产、优质的大穗、大粒型品种，才能充分发挥地膜覆盖增穗、增粒、增重的增产效果。播前要精选种子，并用种衣剂进行拌种。

（6）规范播种

这是穴播小麦能否成功的关键。穴播小麦是平铺膜。机引穴播选用幅宽 140cm 的超薄地膜（0.005～0.006mm），人力穴播选用幅宽 70cm 的超薄地膜。人工铺膜，膜两边 9cm 垂直压入土中，膜与膜间距 20cm。机械播种，采用机引小麦穴插机，边覆膜边播种，140cm 宽的地膜，每幅种 7 行，行距 20cm，穴距 10cm，每公顷种 46.5 万穴；人力播种，先铺膜，后用双行人力小麦穴播机进行播种，每幅种 4 行，行距 18cm，穴距 10cm，每公顷种 49.5 万穴。播期，春小麦提前 10～15 天，以增加有效积温；冬小麦推迟 10～15 天，以防冬前旺长。播量，穴播小麦一般应比露划、地小麦减少 10%左右。但过晚播种的冬小麦和迟播春小麦应保持常规播量。一般冬小麦每穴播 8～10 粒，亩下种子 24～30 万粒，每亩基本苗数 16 万～18 万，晚播的要达到 20 万；春小麦每穴播 10 粒～14 粒，每亩下种子 30 万～40 万粒，亩基本苗数早播的 30 万，晚播的 35 万～40 万。机播时，行走速度要均匀，过快易造成机器鸭嘴将种子带到土壤表面，降低出苗率。同时要边播种，边在膜上每隔 2～3m 压一道细土梁，以使地膜与地表贴紧，这样既保墒，又可防大风揭膜。

（7）田间管理

播后检查地膜是否完整压严，遇到破口要及时封口压实，防风揭膜。小麦出苗后，要勤查看，对缺苗空穴及时浸种催芽补种，对压在膜下的麦苗要及时用小铁丝钩轻轻掏出，并用土封好膜孔。冬季要管护好地膜，严禁人畜进地践踏、啃食。待开春小麦返青后，清除杂草和膜面泥土，并进行第二次放苗。高秆品种和群体过大的旺苗，拔节期每亩用多效唑 15g 兑水 50kg 喷雾，防止旺长和倒伏。孕穗期至扬花期，可进行叶面喷肥，也可根据病虫害的危害程度配相应的农药混合喷洒。种在水地上的穴播小麦，冬小麦头水一般灌在越冬前，二水灌在孕穗前；春小麦头水可推迟到 5 叶 1 心左右，二水在开花期，一般每亩灌水 $70m^3$。

3.3.4.2 垄盖膜际精播小麦（山西模式）的栽培

（1）技术要点

小麦垄盖膜际精播栽培技术，是在播种时，按30cm间距，等距离开沟起垄，垄上覆盖地膜，膜际精量种植2行小麦的一种高产高效栽培新技术。适宜在我国华北、西北旱地农区推广应用。

（2）地块选择

平地、缓坡地均可，但土层要深厚，土壤肥力要中等偏上。

（3）深翻整地

前茬作物收获后，及时进行深翻，并精细整地，要求达到上虚下实、无根茬、无土块、地平土细。

（4）重施底肥

结合播前整地将所需肥料一次全部施入。施肥量依地力和计划产量来定，在降水正常年份，计划亩产350～400kg，每亩需施纯氮10～12kg（折合尿素22～26kg）、五氧化二磷8～10kg（折合过磷酸钙50～62kg）。地下害虫严重地块，可用甲拌磷或1605粉1.5kg进行土壤处理。

（5）品种选择

垄盖膜际精播小麦，宜选择适合当地气候条件的冬性较强、抗病、抗倒、大穗大粒、高产、优质的中矮秆小麦品种。播前进行晒种、拌种，有条件的可用种衣剂拌种，以防虫、防病，保证基本苗。

（6）规范播种

地膜选用幅宽40cm的超薄地膜，播种用起垄覆膜播种机进行。垄、沟相间，各宽30cm，垄高1～10cm，呈圆顶状，每沟在膜际种2行小麦，形成宽窄行种植模式，宽行34～36cm，窄行24～26cm。播种量采用精量，比一般露地小麦减少2/3种子，每亩2.5～3.0kg，也可根据播期、地力、品种等条件灵活掌握。播期可按照当地的最佳播期适当推迟4～5天，不推迟播种的要降低播量。

（7）田间管理

一是及时查苗补苗。小麦播后遇雨要及时破板松土促出苗，同时查苗补苗，缺苗在30cm以上的要及时采取在膜内点播补种，苗过稠则要及早疏苗。二是冬管育壮苗。冬前壮苗标准：麦苗匍匐，生长一致，健壮，叶宽、短、深绿，分蘖节粗壮，根蘖协调（每蘖两条次生根），7～8叶1心，单株分蘖10个以上，总茎数比成穗数多一倍。对因播种原因造成的各种弱苗，可分别采用中耕破板、增温保墒、通气追肥、叶面喷肥等措施，增蘖壮根，促进转化。三是除草防病攻粒重。春季应早中耕除草，或在小麦拔节前用除草剂“巨星”1g，兑水50kg喷雾除草。生育后期攻粒重，小麦孕穗期和灌浆期，注意防治小麦红蜘蛛、穗蚜等，叶面喷施磷酸二氢钾、微肥，养根护叶，防止早衰，促灌浆、增粒、增重。四是保护好地膜。小麦播后，冬春季节要严禁牲畜进地践踏和啃青，并注意人为割草毁膜和大风揭膜。

3.3.4.3 全程微型聚水两元覆盖小麦（农林科大模式）栽培

（1）栽培技术要点

旱地小麦自然降水高效利用模式是西北农林科技大学乾县试区，在过去研究的基础上，针对黄土台塬区，特别是渭北高原的自然降水特点，通过多年试验，研究成功的系列栽培模式，包括旱地小麦夏闲期微型聚水两元覆盖栽培、旱地小麦全生育期起垄覆膜沟播栽培、旱地小麦全程地膜覆盖高产栽培及旱地小麦全程微型聚水两元覆盖栽培等类型。

（2）地块选择

平地或缓坡地均可，但要土层深厚，肥力中上，才能充分发挥其聚水蓄水性能，使增产潜力得到最大程度挖掘。

（3）深翻整地

深翻 20cm 以上，耕后耙耱，精细整地，使土壤达到细碎绵软、无根茬、无土块。

（4）开沟起垄

精细整地后，按 60cm 间距开沟起垄，垄、沟宽各 60cm，垄高 15cm，垄体要整平、拍光，垄顶呈低半圆弧形。起垄前将所需肥料的 1/3 均匀施在垄下。缓坡地沿等高线开沟起垄，沟底要修平，以利蓄水。

（5）覆膜盖草

垄、沟整修好以后，垄上覆盖地膜，沟内覆盖麦草。地膜用幅宽 80cm、厚 0.006mm 的超薄地膜。覆膜时，紧贴垄的两侧用小镢各开 1 条深 7～8cm 的沟，将膜两边垂直压实，并拉紧铺展，紧贴垄面，然后每隔 2～3m 在膜面上压一土带，以防风揭膜。为防降水在沟内流动，每隔 2～3m 在沟内修一略低于垄体的横档，以增加就地入渗量。最后，在沟内覆盖已碾打过的麦草，每亩盖 200～250kg，覆盖后在麦草上用锨撒一些土，以防被风吹起。

（6）品种选择

宜选择适合当地条件的冬性较强、抗病、抗倒、大穗大粒、高产、优质的中矮秆品种，如长武 134 等品种。

（7）播前备耕

临播前，将沟内未腐烂的麦草搂到地边，然后将所需 2/3 的肥料全部施入沟内，用锄深锄，使肥土相混，最后耙平地面。肥料最好用尿素和磷酸二氢铵，用三行条播机进行深施，施前量好先中耕松土 1 次。施肥量依地力和产量指标而定，在降水正常年份，欲每亩产 350～400kg，每亩需施纯氮 10～12kg、五氧化二磷 8～10kg。

（8）精细播种

施肥整平沟面后，用条播机进行播种，每沟种 4 行；垄上地膜不揭，用人力小麦穴播机进行播种，每垄种 2 行。播种时期，沟内条播在当地小麦播种最适期进

行；垄上穴播应较沟内条播晚 4～5 天。播种量，每亩合计 9～10kg。沟内播种后，将耧至地边的麦草再均匀覆盖于其上。

（9）田间管理

垄上穴播小麦，发现错位压苗的，要用小铁丝钩轻轻掏出压在膜内的麦苗；冬春季节，严禁牲畜进地践踏和啃食麦苗；有杂草危害时，可用除草剂或人工中耕清除；小麦生育期，发现病虫害时，要及时对症防治。

为了进一步提高经济效益和水分利用效率，夏闲期还可在沟内种一季经济价值较高的经济作物，如矮生菜豆、无架豇豆或早熟高产玉米等，密度不要太大，每沟种 1 行，豆类每亩 2000 株，玉米每亩 1500 株。雨天，迫使降水聚集于沟中，既满足作物需要，又通过下渗、旁渗，发挥土壤水库的整体功能；晴天，利用地膜、麦草覆盖保墒，减少土壤水分的蒸发损失。这样大间距低密度种植作物，消耗的土壤水分要比通常满种的作物少得多。采用这种“边蓄边用，用中有蓄”的节水办法，并不影响蓄水。秋播小麦时，在原玉米行加重施肥，次年小麦不仅没有减产，还可获得 300～400kg/亩的好收成。

3.3.4.4　旱地玉米地膜覆盖栽培技术

玉米是旱地重要的高产作物。随着畜牧业和综合利用的不断发展，玉米不仅是粮食作物而且是重要的经济和饲料兼用作物，在国民经济中具有非常重要的作用。

旱地缺水是影响玉米正常生长发育的最主要限制因素，因此，如何蓄住天上降水，最大限度地提高水分利用效率是旱地玉米栽培的主要任务。

旱地地膜覆盖栽培玉米，通过地膜的透光、保水、增温作用，改变了土壤物理性状和玉米田间小气候，相应促进了土壤养分的分解、释放和供给，再加上人为有目的地增施肥料、选用良种、科学管理、防治杂草和病虫害等措施，是达到增产增收，使单产水平显著提高的一项重要措施。

（1）播前准备

① 选用地膜　因各地气候条件、雨量多少、土壤类型、地域状况不同，地膜选用各有差异。高海拔、低温寡照、多雨地区，宜选用厚度 0.007～0.008mm、宽 60～70cm 的地膜；干旱少雨地区宜选用厚度 0.006～0.007mm、宽 70～80cm 的地膜；春玉米区宜选用厚度 0.005～0.007mm、宽 70cm 的地膜。

② 选择田块　宜选择土壤条件和茬口较好的地块。土壤条件要求土层深厚，土壤结构良好，疏松通气，渗水和保水保肥性能较好，具有中等以上肥力，地势平坦或缓坡地。茬口要求前茬作物以麦类、玉米、马铃薯、豆类或绿肥地为好。

③ 精细整地，施足底肥　地膜覆盖田块必须冬前耕翻，以便接纳雨雪，蓄足底墒。春后及时耙耱保墒、整地，拣拾田间石块、残根、杂草，打碎土块，结合耕耙整地施足底肥，合墒起垄，整平垄面，覆膜保墒提湿，以备待播。

沟施底肥与起垄方法：在计划播种玉米的行内，用犁或人工开沟，沟深 15cm、宽 20～25cm，把肥料施入沟内，先施化肥，再施有机肥，磷肥与有机肥均匀拌合

或堆沤后一起施。施肥量为：优质农家肥 3000～5000kg（丰产田 5100～7500kg）、碳酸氢铵 40～50kg、磷肥 50kg（或磷酸二氢铵 11～20kg），施肥后结合土壤处理盖土起垄，垄高 10～12cm，垄宽 60cm。

④ 因地制宜，选用良种　地膜玉米宜选用品质优良、增产潜力大、抗逆性强的紧凑型玉米杂交种。春玉米区，海拔高度 900～1200m 的，宜选用中晚熟品种；海拔 1200～1400m 的，宜选用中熟品种；海拔 1400m 以上，宜选用中早熟品种。

种子质量：种子色泽光亮，籽粒成熟饱满，具有本品种固有颜色，大小一致，无破损，无虫蛀，纯度和净度分别在 96%和 97%以上，种子发芽率不低于 90%，含水量不高于 13%。

晒种和选种：播前晴天将种子晾晒 2～3 天，并结合晾晒进行选种，清除种子中的杂物杂屑，拣去杂粒、秕粒、破粒和霉变粒。

浸种、催芽和拌种：播种前 2～3 天将种子用清水浸泡 11～24h，捞出空水后，每千克种子拌锌肥 4～6g，装入清洁的塑料袋内或盆内，放在 25～30℃的热炕上，一昼夜即可露白，当 70%的种子露白时即可播种。播前用药剂拌种，用种子量 0.3%的粉锈宁拌种，可预防玉米丝黑穗病；用 50%的辛硫磷乳剂每千克种子 2mg 拌种，可防治地下害虫。

（2）播种，覆膜

① 播种期　播种期的确定以出苗避开当地晚霜期为宜，一般比露地玉米早播 7～10 天。当露地 5cm 地温稳定通过 7℃时即播种。

② 播种方法　一是先覆膜后播种。先覆膜的采取打孔播种，方法是选 1.5～2cm 粗的木棍，端头削成扁平形，在 4cm、5cm 处钉一横钉，在垄膜播种处穿孔打穴，横钉靠地面即可，每穴下种子 2 粒，或隔穴 3 粒。墒情差时，应坐水点播。播深要一致，以 3～4cm 为宜，播后回土填实，封好膜孔。二是先播种后覆膜。起垄后未覆盖地膜的田块，可趁墒先播（墒不足时也需坐水点播，播后覆膜）。开穴播种，每穴 2～3 粒，播深 3～4cm，播后覆土，整平垄面，喷洒除草剂后覆膜，用土严封两边和膜端。

此外，可用地膜玉米播种机一次完成打孔、播种、覆膜等多道工序。播后覆膜前，每亩用拉索（除草剂）200g 兑水 50～75kg 均匀喷洒垄面，喷后覆膜。覆膜后，膜上每隔 3m 横压 10cm 厚、5cm 宽土带，防风揭膜。

③ 播种密度　按所选用品种确定种植密度，一般亩株数 3500～4500 株，与马铃薯间套种时每亩株数以 2500～3000 株为宜。每垄播 1 行，小行距 40～50cm，穴（窝）距 23～27cm。

（3）苗期和中期（抽雄前）管理

地膜覆盖玉米播种后 20 天左右出苗，出苗后就要及时采取田间管理措施。

① 破膜放苗　玉米出苗后，不能自行顶破地膜，如不及时破膜放苗，则叶子贴膜上，遇到高温天气就会烫伤。因此，播种后，要常在田间检查，待出苗 50%

左右时，就要开始分批破膜放苗。

放苗时间：幼苗出土第一片叶片展开后，应及时破膜放苗，防止高温烫伤幼苗叶片。放苗应在无风的晴天，上午 10 时前或下午 4 时后进行，切勿在晴天高温或大风降温时放苗。因膜内温、湿条件好，幼苗娇嫩，高温放苗易造成幼苗失水萎蔫枯死；大风降温天气放苗，幼苗易遭受冻害。

放苗方法：用小刀、竹片或铁丝钩等，将苗上面的地膜划破一小孔，将苗引出膜后，随即用细湿土沿苗严封破孔，但切勿压幼苗叶片。破孔严封后，可以防止空气流通，避免散热失水跑墒和降温，并能抑制杂草生长。

② 查苗补苗　地膜覆盖玉米一般出苗比较整齐，但也常因播期过早、地温低、种子发芽率低、土壤缺墒、施肥不当、虫鼠害等而造成缺苗断垄，需采取补苗措施。

一是补种。在破膜放苗时，发现缺苗断垄，可及时催芽补种（补种前 3 天催芽）。补种方法是用直径 1cm 左右的木棍，将一头削尖，并在 4cm 处横钉一个铁钉，对准缺苗的地方打洞，洞深以铁钉落到地膜上为准，将发芽的种子放入洞内，补种后随即用细湿土填孔盖住洞口。补种后 3～5 天，要检查出苗情况，出苗后要及时补施肥，促其平衡生长。

二是补苗。在苗 2～3 叶期，如发现缺苗或死苗，可结合间定苗移苗补栽。方法是从稠苗处挖幼苗，栽在缺苗处，栽后灌水，然后严封膜孔，成活后补追 1 次苗肥。

③ 定苗除蘖　定苗应根据苗龄、虫鼠害和天气状况确定。一般根据苗龄定苗，应在 3～4 叶期间苗，4～5 叶期定苗，地下虫害严重或风口地块，可适当晚定苗，每穴留 1 株，去弱苗，留壮苗、大苗。地膜玉米由于土温和营养条件较好，对幼苗生长有利，且杂交种分蘖力强，在 6～8 叶期拔节前后，易从茎基部长出分蘖．这些分蘖既消耗养分，又不能成穗，影响主茎生长发育，必须随时检查，及早分次除蘖。

④ 中耕除草　由于地膜覆盖不便于进行中耕除草，所以要求播后覆膜前进行化学除草。杂草在苗期不易造成危害，但到中期，有些杂草易破膜而出，且空行间杂草易丛生，这时应再采取化学除草或人工拔除办法消灭杂草。当玉米生长进入拔节期后，有揭膜习惯的，揭膜后应立即进行中耕除草，同时要做到深中耕，多培土。

⑤ 追肥灌水　地膜玉米根系发达，吸收能力强，有前期发苗快，地力消耗多的特点，地力过差或底肥不足时，易出现脱肥和早衰现象。所以，要在拔节前后，加强苗期管理，及时进行追肥，有条件的要进行灌水。

追肥采用打孔追肥，以提高肥料利用率。方法是选用直径 3cm、长 50cm 的木棍，上端做一个手握横柄，下端削尖，并在 12～14cm 处钉一个横木片，在地膜玉米窄行内，每 4 株玉米中间打一个孔，把肥料施入孔内，随即用细土封严孔口。遇

天旱，可将肥料兑成水溶液浇施到孔内，效果更好。

根据玉米需肥规律，亩产500kg玉米，需纯氮16kg，在基肥施足70%的基础上，每亩穗肥需施纯氮5kg左右。追肥最好用尿素，每亩用量10～12kg。每亩用量不超10kg时，可一次追施，超过10kg时，可分两次追施，前重后轻。

玉米追施穗肥的最佳时间是雌穗分化小穗和小花期，即玉米大喇叭口期。按品种分：中熟品种，总叶片数20片左右，应在10～11片全展时追施；中晚熟品种，总叶片数21～22片，可在11～12片叶全展时追施；早熟品种，在9片叶全展时追施。

⑥ 防治病虫害　玉米苗期和中期病害较少，但虫害较多，主要有粘虫、地老虎、蝼蛄、玉米螟、蚜虫等，要及时测报和防治。

玉米螟防治：在玉米心叶末期，被害株超过5%时采用颗粒剂防治。方法是用50%乙基1605乳油500g加水10kg拌入25kg过筛的煤渣颗粒中，晾干后，撒入玉米心叶丛中4～5片叶内，每株约2g；或用甲拌磷毒砂撒入心叶中；或用90%敌百虫800～1000倍液灌心叶，每千克药液可灌600～1000株。

黏虫防治：重点抓住幼龄期防治。当每平方米查测幼虫达0.5头时即应采取措施，用晶体敌百虫每亩50g兑水30kg喷雾防治或用敌百虫100g溶于水中喷洒在5kg碾碎的油渣中和5kg切碎的青草中制成毒饵，于傍晚撒入玉米行间，既可毒杀黏虫，还可防治地老虎。

（4）后期管理

地膜玉米后期管理是从抽穗到成熟期的管理，主攻目标是保粒增重，提高产量。玉米合理的长相是茎秆直立，叶色深绿，植株健壮，不早衰，活根活叶到收获。

① 继续抓好病虫害防治　抓住时机主要控制玉米螟和大、小叶斑病及黑穗病等病虫害的发生和危害。大、小叶斑病的防治措施是：在秋季多雨及病害重发年份，可用代森锰锌、多菌灵之类杀菌剂于玉米花丝期前后喷洒叶面，每隔7天1次，连喷2～3次。

② 叶面喷肥　抽雄至灌浆初期，每亩可用0.2%～0.3%的磷酸二氢钾40kg叶面喷施，或在玉米大喇叭口后期，每亩用25mL“翠竹”牌植物生长调节剂兑水15kg喷雾，既可降低植株高度防倒，又可增产。在开花期田间有发黄脱肥植株时，应适量追施硝酸铵或尿素，以攻粒增重。

③ 去雄授粉　地膜玉米隔行或隔株去雄，是一项简单易行、促进早熟增产的措施。去雄可减少养分消耗，改善玉米地上部分通风透光条件，减轻玉米蚜虫的危害。去雄方法是把玉米植株倾斜，用手握住雄穗，往上轻轻一提，就可拔除。为了保证有足够的花粉量，一般隔行或隔株去雄，去雄数不超过总数的一半。

玉米人工辅助授粉，是减少秃顶缺粒、提高产量和品质的一项有效措施。当田间大部分雌穗花丝露出后，选择晴朗无风或微风天气，上午9～11时在露水干后开

始授粉，中午高温来临前停止。一般授粉 2～3 次，每次间隔 3～5 天为宜。方法是用容器收集壮株花粉，混合授在花丝上，也可用木棒轻敲未去雄的植株，促其花粉散开，以满足雌穗花丝对花粉的需求。

④ 及时收获，清除废膜　玉米地膜覆盖栽培多是活秆成熟，因此，最好用生理成熟来确定玉米成熟期。生理成热的标志是果穗籽粒基部露出黑褐色沉积物，称为黑层，表示籽粒养分通道已经堵塞，即达到生理成热。检查方法是扒开果穗苞叶，连取 10 穗，每穗每行 2～3 粒，混合后，任取 100 粒，出现黑层的粒数达 75%时，即为生理成熟期。为确保高产和品质，玉米收获期可适当晚些，以利干燥。适宜收获期为完熟期，即果穗苞叶松散，籽粒内含物完全硬化，指甲不易掐破，籽粒表面鲜明光硬，出现黑层，植株呈现黄色，就可及时收获。收获后，消除禾秆根茬，及早将残膜清除干净，防止废膜影响耕作和下茬作物根系生长。

3.4　砂石覆盖栽培技术

砂石覆盖是利用卵石、砾石、粗砂和细砂的混合体，在土壤表面上覆盖一层厚度为 5～15cm 的覆盖层，它是砂田的主要组成部分（图 3-2）。砂石覆盖农田在我国起源较早，主要分布在特别干旱的甘肃、山西、陕西等省。尤以甘肃较多，距今已有三百多年。甘肃省 1980 年统计，全省约有砂田 8 万公顷左右。在兰州市及其附近的景泰、靖远、永登、皋兰等县砂田最多。山西晋中地区约在 100 多年前已应用砂田种植瓜果、蔬菜等作物，以后又扩展到晋南地区，种植棉花等经济作物，到 20 世纪 50 年代末山西全省砂田植棉已发展到 6667 公顷左右。砂田主要分布在年均气温 8～10℃，无霜期 160～180 天，年降水量 180～300mm，且分布不均，年蒸发量 1000～1500mm，经常发生土壤干旱和大气干旱的地区。由于砂石覆盖对土壤生态条件的改善，使得这些地区在没有灌溉的条件下，也能栽培经济价值很高的瓜果、蔬菜和经济作物，并获得较高而稳定的产量。

3.4.1　砂石覆盖的作用

由于地面覆盖的砂石层颜色较深，表面凹凸不平，孔隙大，毛细管作用差，故在太阳辐射下吸热多，保温好，增温快。据山西农科院在山西万荣地区试验研究，砂石覆盖较露地土壤在 10cm 处的地温高 0.3～0.9℃。与土田相比，砂田的土壤温度较高，最高、最低温度出现的时间较晚，日温变幅较小。据测定结果，4 月份土壤温度较低，砂田与土田的土壤温度差异较小，地面下 8cm 处的日平均温度，砂田比土田高 0.8℃，23cm 处，砂田比土田低 0.3℃。日温变幅砂田比土田分别小 4.5℃和 1.0℃。在 6 月份，地表 8cm 和 23cm 处的日平均土温，砂田分别比土田高 4.3℃和 2.5℃，日温变幅砂田比土田分别小 4.3℃和 0.7℃。在 9 月份，地面下 8cm 和 23cm 处的日平均土温，砂田分别比土田高 5.2℃和 2.1℃。日温变幅砂田

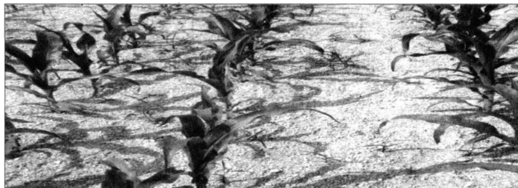


图 3-2 沙石覆盖的玉米田

比土田分别低 2.7℃和 0.8℃。

农田覆盖砂石后，由于砂石层结构疏松，砂粒间空隙大，渗透性好，因此降水就地入渗快，地面径流少，蓄水多；另外，砂石层覆盖切断了土壤毛细管，土壤蒸发失水少。据测定，与露地比较，铺砂田水分渗入率增加 9 倍，而每天的蒸发量仅为露地的 1/5。从水分垂直分布看，0～20cm 土壤含水量增加相对值为 51.74%，20～50cm 为 130.4%，50～100cm 为 88.62%，这表明砂田水分渗入的深度和强度均较露地高。由于土壤储水量多，可以保证农作物正常生长的水分供应，使农作物具有强大的根系和较合理的叶面积，蒸腾作用和光合作用都较为旺盛，因而不仅可以使农作物达到早熟、优质、高产，而且在大旱之年还可以保证有一定的收成。

砂石覆盖的农田还具有保土保肥、保护土壤结构、防止土壤盐碱化的作用。砂石覆盖的农田，土壤避免了直接的风吹日晒，同时一般降水都能就地入渗，避免了径流冲刷，因此，土壤可免遭水蚀、风蚀；在砂石覆盖下，土壤微生物数量增加，活性增强，促进了土壤有效养分的转化。在砂石覆盖下，表土不板结；土壤实行免耕、少耕，土壤结构和层次受破坏较少，相对比较稳定；在干旱少雨地区，常因土壤蒸发强烈和降水淋溶作用低，使盐分上升累积到土壤表层，砂石覆盖具有明显的减少土壤蒸发的效果，有效地抑制了土壤下层可溶性盐类随水分下降而聚积地表。又由于砂石层接纳雨水多，通过降雨的洗淋作用，又降低了表土中的盐分。据研究测定，荒地覆沙后，0～20cm、20～56cm、56～73cm、73～107cm 土层的脱盐率分别为 81.20%、63.33%、77.7%和 50.52%。

除此之外，砂石覆盖还具有减少病虫、杂草危害，促进农作物生长发育的作用。

3.4.2 砂田的种类和建设

3.4.2.1 砂田种类

按照砂田的灌溉条件来分，有水砂田和旱砂田。旱砂田是指铺设在无灌溉条件

的旱地上的砂田，它仅靠自然降水进行生产。旱砂田寿命长，头 20 年为新砂田，20～40 年为中砂田，40～60 年或以上为老砂田，一般可达 40～60 年，甚至还有近百年的。随着使用年限的延长，旱砂田的砂土混合日益严重，增温、保墒、压盐碱的作用逐年降低，同时肥力也日渐下降。因此，新砂田性能好、地力高、效益好。中砂田砂土混合程度增加，砂石覆盖的作用减小，肥力下降，产量降低。老砂田因砂石覆盖中含土量日渐增多，覆盖作用逐渐降低，增产作用也越来越小。水砂田是指铺设在有灌溉条件的水浇地上的砂田。水砂田寿命短，仅为 5～6 年，头 2 年为新砂田，第 3 年为中砂田，4～5 年为老砂田。水砂田主要用于种植蔬菜、瓜果、棉花等经济价值较高的作物。这种砂田一般多采用清砂覆盖，砂石覆盖层很薄。水砂田砂和土因灌溉易于混合，因而寿命短。老砂田使砂土混合比重增加，砂田作用逐渐消失，肥力下降，产量降低。因此一般使用 3～5 年后就需要起砂重新铺设。

按覆盖砂石来分，有卵石砂田（清砂田）和碎石砂田（混砂田），卵石砂田砂石一般为直径约 0.5～10.0cm 的卵石和砂粒的混合物。卵石砂田质量最优，它光滑，结构疏松，不易板结，保墒保温性能好，且便于耕作管理。碎石砂田覆盖层是由大小不等、形状不规则的砾石、砂粒和细土混合而成，碎石砂田因其覆盖层含土量较多，雨后易板结，渗水性差、保墒、保温、压碱等效果比较差。

3.4.2.2　砂田建设

砂田是一种用砂石混合物作为覆盖材料覆盖在土壤表面而建造的农田。砂田选地要求地形平坦，坡度不超 15°，土壤肥沃。不能选用凹地，以免洪水淤积，砂土混合，缩短砂田使用寿命。砂田建设首先要平整土地，耕翻耙耱，压实后铺砂。土地平整后，要进行施肥，一般把有机肥铺撒在土壤的表层，这样可以减少砂土混合，同时也有利于砂田农作物根系分布在土壤表层吸收利用。砂田铺砂要求薄厚均匀，田面平整。

砂田经过一定的种植时间之后，由于砂土混合，土壤肥力不足，不能满足高产要求，种植作物的产量和品质明显下降，表明砂田需要更新。砂田更新就是要去掉老砂石，换上新砂石，更换砂石的同时要进行深翻、施肥、休闲土壤、恢复地力处理。

3.4.2.3　砂田耕种方法

砂田耕作种植管理的基本要求是：既要为农作物生长创造良好环境条件，又要尽可能防止砂土混合，避免砂田过早老化。

（1）砂田耕作

砂田的种类和种植的作物不同，耕作方法也不一样。新砂田用五齿齿耧，中砂田用耖耧，老砂田用老式犁在春播前纵横穿耕砂石层一次。这些耕作的目的就是疏松砂层，破除板结，增强降水入渗，减少蒸发。特别是在雨后，松砂尤其重要。松砂次数不宜多，视实际情况而定。

（2）施肥与播种

砂田在铺砂时已经施肥，但随着使用年限的增长，砂田营养逐渐减少，因此必须进行追肥。砂田追肥是在植株旁挖穴穴施。每穴施入一把优质有机肥料后覆土压平，再盖回砂石。也可以采用化肥溶液进行根际追施和根外追施。在水砂田，可以在行间或株旁撒施化肥后，再灌水，使其渗入土中。

播种是一项技术性很强的农活，要求行距株距基本一致，播种深浅基本一致。有的农作物可直接播种在砂层下的土壤表层。有的就必须扒开砂层，挖穴播种，然后覆土盖平压实。对一般农作物常采用耧播。播种深度在砂层与土壤衔接处。旱砂田行距较宽，水砂田行距较窄。种植经济作物一般根据其株行距先划行，再用株距木齿耙与行垂直在砂面上划出株距后，开砂点播。

（3）田间管理与收获

砂田作物，间苗时应紧压根部的砂面，轻轻拔掉植株。定苗时，为了不损伤留苗的根系，应将要拔掉的苗，从茎部子叶以下剪断，不能用手直接拔。除草时用小铲铲断杂草在砂层中的根茎部。另外，砂田作物还要防止晚霜冻害。

砂田作物收获时，一般采用连根拔起，砂田中不留茬。

3.5　土表化学覆盖剂

土表化学覆盖剂，又叫土壤保墒增温剂。它是利用高分子化学物质加工成乳剂，喷洒到土壤表面，形成一层膜状物，抑制土壤水分蒸发，也能提高土壤温度、增强土壤抗蚀能力。化学覆盖剂喷洒后，土壤水分向大气蒸发的通道被阻断，在一般日蒸发量为1.5～9mm的情况下，蒸发可减少33%～49%，15天时间里可节水30mm。化学覆盖剂除了抑制土壤水分蒸发外，还可提高土壤温度。据试验测量，晴天地表温度可升高5℃以上，20cm土壤日平均温度上升2℃以上。施用化学覆盖剂可以有效地提高作物产量。黑龙江省海伦县种植玉米试验，使用化学覆盖剂每公顷增产玉米2025～2145kg，增产率67%～71%。

参　考　文　献

[1] 朱勇．高吸水树脂与玉米生长发育的关系［J］．干旱地区农业研究，2000，18（2）：2-32.

[2] 高茂盛，温晓霞，黄灵丹等．耕作和秸秆覆盖对苹果园土壤水分及养分的影响［J］．自然资源学报，2010，25（4）：547-554.

[3] 徐福利，梁银丽，汪有科等．秸秆覆盖保护耕作法土壤水分和温度变化及玉米产量效应［J］．土壤通报，2006，37（4）：648-650.

[4] 张萍，李其昀，于磊等．秸秆覆盖对冬小麦生长状况及产量的影响［J］．山东理工大学学报：自然科学版，2008，22（5）：18-51.

[5] 吴涌泉，屈明，孙芬，陈祖富．秸秆覆盖对土壤理化性状、微生物及生态环境的影响［J］．中国农学通报，2009，25（14）：263-268.

[6] 脱云飞，费良军，杨路华等．秸秆覆盖对夏玉米农田土壤水分与热量影响的模拟研究［J］．农业工程学报，2007，23（6）：27-31.

[7] 孟毅，蔡焕杰，王健等．麦秆覆盖对夏玉米的生长及水分利用的影响［J］．西北农林科技大学学报：自然科学版，2005，33（6）：131-135.

[8] 方文松，朱自玺，刘荣花，马志红，师丽魁．秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究［J］．干旱地区农业研究，2009，27（6）：123-128.
[9] 高亚军，郑险峰，李世清等．农田秸秆覆盖条件下冬小麦增产的水氮条件［J］．农业工程学报，2008，24（1）：55-59.
[10] 张玲，祝元波．稻草不同方式覆盖和免耕与翻犁对油菜产量影响试验总结［J］．耕作与栽培，2006（3）：49.
[11] 白丽婷，海江波，韩清芳等．不同地膜覆盖对渭北旱塬冬小麦生长及水分利用效率的影响［J］．干旱地区农业研究，2010，28（4）：135-139.
[12] 陈素英，张喜英，裴冬等．玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响［J］．农业工程学报，2005，21（10）：171-173.
[13] 李建奇．覆膜对春玉米土壤温度、水分的影响机理研究［J］．耕作与栽培，2006，5：47-50.
[14] 刘顺国，付时丰，汪景宽等．长期地膜覆盖对棕壤水分含量和储量动态变化的影响［J］．沈阳农业大学学报，2006，37（5）：725-730.
[15] 王绍美，金胜利，王刚．半干旱区全覆膜双垄沟播技术对玉米产量和水分利用效率的影响［J］．甘肃农业大学学报，2010，45（4）：100-106.
[16] 党占平，刘文国，周济铭等．渭北旱地冬小麦不同覆盖模式增温效应研究［J］．西北农业学报，2007，16（2）：24-27.
[17] 李世朋，蔡祖聪，杨浩等．长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响［J］．生态学报，2009，29（5）：2489-2498.
[18] 王秀芬，陈百明，毕继业．基于县域的地膜覆盖粮食增产潜力分析［J］．农业工程学报，2005，21（11）：146-149.
[19] 于树，汪景宽，高艳梅．地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物量碳和氮的影响［J］．沈阳农业大学学报，2006，37：602-606.
[20] 李毅，王全九，王文焰等．覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究［J］．植物营养与肥料学报，2005，11（2）：187-193.
[21] 马树庆，王琪，郭建平等．东北地区玉米地膜覆盖增温增产效应的地域变化规律［J］．农业工程学报，2007，23（8）66-71.
[22] 张雷，牛建彪，赵凡．旱作玉米提高降水利用率的覆膜模式研究［J］．干旱地区农业研究，2006，24（2）：8-11，17.
[23] 金胜利，周丽敏，李凤民等．黄土高原地区玉米双垄全膜覆盖沟播栽培技术土壤水温条件及其产量效应［J］．干旱地区农业研究，2010，28（2）：28-33.
[24] 黄占斌，万惠娥，邓西平等．保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应［J］．土壤侵蚀与水土保持学报，1999，5（4）：52-56.
[25] 张义，谢永生，郝明德等．不同地表覆盖方式对苹果园土壤性状及果树生长和产量的影响［J］．应用生态学报，2010，21（2）：279-286.

第 4 章　旱地农业集雨利用工程技术

4.1　集雨保水工程在旱地农业中的地位

4.1.1　雨水农业利用的主要途径

雨水农业利用指通过自然过程或人类活动过程将雨水用于农业生产以提高作物产量和改善农业生态系统的技术，包括集水、保水技术、灌溉利用技术，可分为雨水的自然利用、叠加利用和聚集利用三种基本形式。

（1）自然利用

指对雨水的就地拦蓄、直接利用。该技术不能弥补某地区雨量的不足，也不能进行供水的时空调节，而只能通过旱地农业蓄水保墒技术增加雨水的就地入渗，减小径流与土壤冲蚀，降低水分无效蒸发，从而最高效地利用自然降水。蓄水技术包括深耕、深松、水平等高耕作、水平梯田、等高沟垄种植法及川台地垄沟种植法等，保墒技术主要包括耙耱保墒、中耕保墒及覆盖保墒等。在雨水自然利用条件下，由于降水总量少，年内与年际降水分配不均，旱区农业常由于水分供应不足或供需错位导致作物受旱减产甚至绝产。

（2）叠加利用

指在农田就地聚集雨水，将非耕地上的雨水引导到耕地中，或减少有效耕作面积以实现“雨量叠加增值”的技术。它可以在较小范围内进行雨水的空间调节以弥补某地区某时段雨量的不足，但不能进行时间上的调节使有限的降水应用于作物的关键需水期。该技术主要指小区集水种植技术、隔坡集流的梯田、平地起垄地膜覆盖增墒技术等。

（3）聚集利用

雨水聚集利用指利用一系列工程措施，将天然降水聚集并储存起来用于生活或灌溉，使自然降水变成时空均可调节的现实水资源。雨水聚集技术包括集导引技术、储水技术和灌溉利用技术三个方面。集水工程与导引工程是雨水聚集工程的基础，蓄水工程是雨水聚集工程的核心，灌溉工程是雨水聚集工程的目的。

集水工程是指集水下垫面的处理，在一定的降水条件下，影响集流效率的主要因素为集水面面积、材料、几何特征及前期含水量等。

蓄水工程是储存由集水区导引聚集的雨水径流的设施，它包括引水渠沟或管道、进水管、拦污栅、沉沙地、蓄水设施以及放水装置等部分。其中蓄水设施种类

繁多，如涝池、旱井、田间蓄水池、水窖及水窑窖等，生产实践中以水窖（窑、池）的应用最为普遍。

利用聚集雨水工程所进行的灌溉，一般都采用最为节水的灌溉方式，如滴灌、微喷灌和渗灌等方式。

雨水聚集利用技术体系可概括如图 4-1 所示。

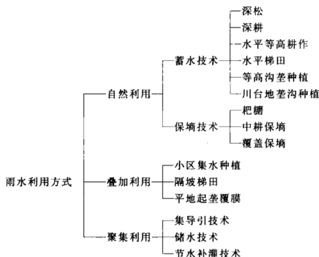


图 4-1　雨水农业利用的主要形式

4.1.2　集水保水技术在旱地农业生产中的地位和发展前景

我国水资源总量虽位居世界第六，但人均水资源量却不足世界人均水平的 1/4，耕地平均水量也仅为世界平均水平的 4/5。加之我国地域辽阔，地表地貌复杂，季风影响显著，水资源在时空分布上也极不平衡。根据全国农业区划委员会《中国综合自然区划》的研究结果，我国干旱半干旱地区的面积占全国总面积的 52.5%，其中年平均降水在 200～250mm 以下的干旱地区占到国土总面积的 30.8%，年平均降水在 250～600mm、降水变率在 30%以上的半干旱地区占 21.7%。根据有关资料分析，干旱及半干旱地区有限的降水量中尚有一半以上集中在夏、秋季以暴雨形式降落。干旱地区没有灌溉就没有农业，半干旱地区在没有灌溉条件下，旱灾发生频率很大，农作物收成极不稳定，有些地区甚至人畜饮水都得不到保证，干旱缺水是制约这些地区农业生产和农村经济发展的主要因素。由于地形、地貌、财力和水资源开发条件的限制，从目前乃至今后相当长的时间内，干旱半干旱地区甚至一些湿润易旱区不可能大规模发展骨干灌溉工程，因此大力发展以雨水蓄存和雨水资源化为核心的集雨窖蓄灌溉是这些地区农业发展的重要举措，也成为严重缺水地区的生命线工程。

干旱半干旱地区雨水资源潜力巨大，具备开展集雨窖灌、发展节水高效农业的

良好条件。就我国黄土高原地区而言，总土地面积 $6.2\times10^5km^2$，年均降水443mm，总量达 $2.757\times10^{11}m^3$，是地下水地表水资源量的9.2倍。这一地区降水时间分布不均，降水期常常与作物需水期不匹配，且降雨多为暴雨，土壤蓄积水分可被作物利用的不多，60%～70%的降水多以地面径流和无效蒸发的形式损失掉，降水利用率极低，粮食作物的降水生产效率仅为4.5～6.0kg/(hm^2·mm)，远低于国内目前15kg/(hm^2·mm)的水平。现有的研究和生产实践表明，在这一地区采用有限补充灌溉、合理的供水和栽培管理，雨水利用率可显著提高，粮食作物单位面积提高1～2倍，苹果每公顷可增产15000kg是完全可能的，而且这一地区人口密度小，人均土地面积较为充裕，加之土地多为坡地，有利于营建雨水汇集场，雨水就近拦蓄存储，补充灌溉时无须高扬程提引，经济实用，再配套以先进的灌溉方法和管理措施，投资小、见效快，易于推广。

开展雨水集蓄利用，有利于保护生态环境、帮助农民脱贫致富和干旱半干旱地区资源的开发利用。在上述地区，一方面水资源奇缺，但另一方面，经常遭受汛期暴雨径流的冲刷，致使水土流失严重，土壤肥力下降，生态环境恶化，农民生活困难。开展集雨窖灌将有利于治理水土流失，改善生态环境，促进农民脱贫致富；同时还可发展优质高效农业，为当地提供粮食、果品、蔬菜等农产品的保障，促进其工业发展。因此开展集雨窖灌，充分利用当地雨水，将对干旱半干旱地区的粮果增产，完成农村脱贫和促进地区经济发展都具有十分重要的作用。而且对防治水土流失、改善生态环境亦有十分重要的意义，是治理水土流失和提高旱作物生产力的一个结合点。

雨水是旱区农业生产的主要或唯一的水分来源，雨水利用是一项古老而又有巨大发展潜力的技术，我国人民在长期的农业生产实践中积累了丰富的雨水利用经验，如春秋时期黄土高原地区采用的引洪漫地技术、600多年前的水窖等。近年来，随着全球性干旱问题的加剧，世界各国都十分重视雨水利用。以色列、澳大利亚、美国、印度等国已将雨水利用作为面向未来的战略选择。近年来，中国北方一些省区雨水利用实践进展很快，甘肃、宁夏、内蒙古、山西和陕西五省区仅1996年至1999年新增水窖100余万眼，已形成具有一定区域特色的旱区集雨农业模式，展现出诱人的前景。同时该项技术在湿润易旱的南方丘陵山区也有了较大的发展。

4.2 雨水集蓄利用工程规划

为使雨水集蓄利用工程健康顺利地发展，首先必须做好工程的规划，其主要内容包括：

① 基本情况分析　降雨资源、地形及集流面条件、社会经济条件等；

② 规划目标及建设雨水集蓄利用工程的必要性和可行性分析；

③ 需水规划　人畜饮用水、发展庭院经济及大田节水灌溉需水量分析；

④ 集流面规划　在水量供需平衡的基础上，选择各类集流面并确定相应的面积；

⑤ 蓄水工程规划　蓄水工程类型选择及蓄集水量确定；

⑥ 供水及灌溉工程规划　灌溉方式选择及规划；

⑦ 工程建设费用与国家、地方和群众投入资金、劳力分析以及工程效益分析；

⑧ 实施措施　村组两级的雨水集蓄利用工程规划：还应对工程地点选择、工程布置作出具体规划。

4.2.1　基本资料的收集

为了根据具体情况因地制宜地做好雨水集蓄利用工程的规划设计与施工，应做好基本资料的收集。主要包括降水量、地形、庭院及房屋、沥青路面面积、集流面性质及面积、人口及牧畜数、集雨补灌作物种类及面积，已建成的集雨蓄水设施规模等有关资料。

降水资料包括工程地点的多年平均降雨量、保证率为 50%、75%及 90%的年降雨量。工程地点附近有气象站或雨量站的资料年限不少于 10 年时，可收集实测资料并进行统计分析计算。当实测资料不具备或不充分时可查阅有关水文手册。

地形资料一般可不要求有地形图，但应有集流面、蓄水设施及灌溉土地之间的相对高程资料。

对屋面、庭院、计划作为集水面的公路、乡村道路、场院及天然坡面等按投影面积进行量测。

对工程范围内的人口、大小牧畜数进行调查，并对今后 10 年内的发展数字作出预测。

对雨水集蓄利用灌溉的作物种类、树种及其面积进行调查。除点式灌溉外，其他灌水方法应有灌溉土地的平面尺寸及相对高程资料。

对工程范围内已建的雨水集流面性质、面积、蓄水设施的种类、数量及容积进行调查。

调查当地建筑材料的数量与分布地点。

4.2.2　需水计划

根据雨水利用工程的目标制定用水计划、用水量。结合人畜用水的集雨窖蓄灌溉工程，应做好人畜用水计划。

（1） 人畜用水规划

人畜饮用水不同设计年份的标准可参考表 4-1 确定。调查目前人口数量、分布组成，制定出本区内人畜饮用窖水计划，并统计出已有窖的储水能力和计算出所需发展窖的容积及数量，按每户计算，每户人畜饮用水量可按未来 10

年内能达到的人口数及牲畜数计算，区域性规划时，可按区域统计资料及发展规划计算。

表 4-1　人畜饮用水定额

项　目	单　位	平水年	特殊干旱年
人	kg/(人·天)	10～30	6
大牲畜	kg/(头·天)	40～50	20
小牲畜	kg/(头·天)	5～10	3

注：平水年降雨保证率 50%，特殊干旱年保证率 90%，其他干旱年份可内插。

(2) 灌溉用水量

集蓄雨水灌溉应采用节水灌溉方法，按非充分灌溉（限额灌溉）的原理，根据当地或类似地区作物需水量和本地区作物生育期的降雨量或灌溉制度试验资料确定。对粮食作物和蔬菜节水灌溉的全年每公顷灌溉用水量可按公式（4-1）估算。

$$M_{节}=0.667\cdot\eta_{节}(ET_C-P_{有}-W_S)/\eta_{田} \tag{4-1}$$

式中 $M_{节}$——不同年份节水灌溉条件下年灌溉定额，$m^3\cdot hm^{-1}$；

$\eta_{节}$——集雨窖灌水量的折减系数，在考虑作物生育阶段和灌水方法后确定，一般为 0.4～0.7，稀植作物和果树取低值，密植作物与蔬菜取高值；点浇点灌、坐水种、滴灌、渗灌、小管出流灌溉取低值，喷灌、膜上灌溉取高值；

ET_C——果树或作物的全年需水量，mm，见表 4-2；

$P_{有}$——不同年份作物生育期有效雨量，mm，可采用不同年份各地作物生育期内降雨量乘以降雨有效利用系数而得，降雨有效利用系数可参考表 4-3 选用；

W_S——播前土壤中的有效储水量，可根据实测资料确定，在无实测资料时，可按（0.15～0.25）ET_C 作粗略估计；

$\eta_{田}$——灌溉田间水利用率，取值 0.8～0.95。采用膜上灌、喷灌取低值，其他节水灌溉方法取高值。

粮食作物和蔬菜的灌溉用水量也可按表 4-4 中的灌水次数、次灌水量作粗略估计。

各种果树的灌溉用水量随着当地气候条件、土壤条件、果树品种、树龄、产果量及灌水方法等因素的变化差异很大，直接利用果树需水量、耗水系数来推算果树的灌水量有一定困难。因此要在调查当地不同树种在不同降水年份的灌水次数，依据果树灌水关键期和严重干旱期水分特征，在尽量减少灌溉次数条件下，确定年灌水次数，再乘以不同灌水方法的灌水量，见表 4-4。

表 4-2　主要蔬菜的需水量（ET_C）参考值

名称	需水量/mm	日均需水量/mm	α值*	名称	需水量/mm	日均需水量/mm	α值*
大　蒜	668	6.59	0.86	豇　豆	636	6.90	0.82
菠　菜	746	4.65	0.65	夏豇豆	528	6.14	0.83
水萝卜	297	5.40	0.68	夏黄瓜	553	7.80	0.99
莴　笋	322	4.94	0.63	秋黄瓜	817	9.00	1.41
茴　香	311	6.45	0.71	秋菠菜	328	7.35	1.29
洋白菜	552	5.99	0.73	秋菜花	482	5.70	1.09
菜　花	489	6.90	0.84	秋洋白菜	538	5.25	1.18
洋　葱	568	5.55	0.66	秋架豆	720	7.45	1.18
油　菜	280	7.65	0.94	雪里蕻	495	8.54	1.52
甜　椒	818	6.30	0.88	萝　卜	495	6.45	1.22
茄　子	775	8.39	1.00	脆萝卜	579	6.60	1.31
春黄瓜	651	8.24	0.95	胡萝卜	560	5.70	1.14
番　茄	693	7.80	0.84	大白菜	329	6.75	1.34
架　豆	499	6.00	0.73				

注：α为需水系数，即作物需水量与同期水面蒸发量之比。

表 4-3　陕西省主要作物全生育期的降雨利用系数

作　物	年降雨量/mm		
	<350	300～500	>500
夏玉米	0.95	0.80	0.60
春玉米	0.95	0.85	0.75
棉　花	1.00	0.95	0.88
果　树	0.40	0.50	0.60
蔬　菜	0.98	0.85	0.75

表 4-4　各种作物在不同降水量下不同灌水次数与灌水量

灌溉指标	年降雨量/mm	粮食作物		成龄果树	蔬菜、瓜果
		夏作物	秋作物		
灌水次数	300	3～4	3～4	4～5	8～9
	400	2～3	2～3	3～4	6～8
	500	2～3	1～2	2～3	5～6
	600	1～2	1～2	2～3	4～5
灌溉指标	灌水方式	粮食作物		成龄果树	蔬菜、瓜果
		夏作物	秋作物		
次灌水定额/m³	移动式喷灌	15～20	15～20		
	滴灌、水管出流、膜孔灌（部分覆盖）	10～15	10～15	8～15	10～15
	膜孔灌（全地面覆盖）、渗灌	8～12	8～12	7～10	8～10
	穴灌、点浇	5～10	5～10	5～8	5～10

4.2.3 集流面规划

集流场是集蓄雨水的源头，关系到整个集雨窖蓄灌溉工程的正常运行。因此，集流场的选配及集流面的处理，除充分利用现有自然硬化场面（如庭院、柏油路面、村庄道路、场面等）的同时，还可因地制宜、就地取材，做到集水效率提高、成本合算、效益好的人工优化集流场面。

在集流面材料确定后，由以下计算得到的用水量及用水制度、降雨情况及分布、设计保证率，依据集水、用水平衡的原则确定集流面尺寸，其具体操作如下。

（1）全年单位集水面积可集水量

按公式（4-2）计算（不含导引过程的输水损失）：

$$F_P = E_Y R_P / 1000 \tag{4-2}$$

$$R_P = K P_P \tag{4-3}$$

$$P_P = K_P P_0 \tag{4-4}$$

式中 F_P——保证率等于 P 的年份单位集水面积上全年可集水量，m^3/m^2；

E_Y——某种材料集流面全年集流效率，对各种不同集流面形式，集雨效率可参考表 4-5；

R_P——保证率等于 P 的全年降雨量，mm；

K——全年降雨量与降水量之比值，一般为 0.92～0.98 之间，通常取 0.95；

P_P——保证率为 P 的年降水量，mm；

P_0——多年平均降水量（mm），可查有关水文手册；

K_P——根据保证率及 C_v 值、C_s 值推算，C_v 可根据表 4-8 取用，$C_s = 2C_v$。

表 4-5 不同材料集流面的集流效率

多年平均降水/mm	保证率/%	混凝土/%	水泥瓦/%	水泥土/%	塑膜覆砂/%	机瓦/%	青瓦/%	黄土夯实/%	沥青路面/%	自然土坡/%
200～300	50	77.8	71.0	47.5	42.3	42.2	34.2	20.1	66.2	6.0
	75	75.1	66.2	41.8	34.2	34.1	29.3	17.0	64.3	5.0
	90	73.5	62.7	35.2	30.1	30.5	25.1	13.4	63.1	4.0
300～400	50	79.6	74.8	52.3	45.8	19.3	41.1	26.1	68.1	8.0
	75	78.0	71.9	45.7	41.1	12.5	35.3	21.5	66.2	7.0
	90	75.8	68.1	40.9	35.3	38.1	30.5	18.4	64.3	5.0
400～500	50	80.0	75.3	53.5	46.1	50.0	41.3	25.0	68.2	8.0
	75	78.8	74.0	50.8	44.9	47.9	38.2	23.1	66.9	7.0
	90	76.4	71.0	43.2	41.1	39.6	32.4	20.2	65.5	6.0
500～600	50	80.6	75.7	55.0	46.9	51.1	42.5	25.8	68.5	8.3
	75	79.3	73.4	52.4	45.2	49.3	39.9	23.6	67.0	7.2
	90	76.9	71.2	49.1	37.5	47.2	34.2	18.7	65.8	6.1

（2）集水用水平衡计算

雨水集蓄利用工程各类材料集流面所计算的集水量应满足灌溉用水量需求，符

合式（4-5），应对各保证率年份计算所需集流面积，选用其中最大值。

$$W_P \leqslant S_{P1} \cdot F_{P1} + S_{P2} \cdot F_{P2} + \cdots + S_{Pn} \cdot F_{Pn} \tag{4-5}$$

式中　W_P——保证率等于 P 的年份需水量，m^3；

S_{P1}，S_{P2}，…S_{Pn}——保证率等于 P 的年份材料 1，2，…，n 的集流面面积，m^2；

F_{P1}，F_{P2}，…，F_{Pn}——保证率等于 P 的年份材料 1，2，…，n 单位面积可集水量。

4.2.4　蓄水工程规划

根据以上所计算的结果，在尽量保证自流、自压灌溉的情况下，合理布置窑窖的位置，根据各集水小区的面积及其对应的各蓄水工程的类型，规划窑和窖的尺寸、防渗体形式、导引工程及拦截工程等。

蓄水设施的总容积可按下式计算

$$V = \alpha W_{max} \tag{4-6}$$

式中　α——容积系数，取 0.7～0.9；

W_{max}——不同保证率年份用水量中最大值，人畜饮水工程采用平水年用水量计算，灌溉用水采用特殊干旱年用水量计算。

4.2.5　供水用水规划设计

人畜饮用水的规划包括未来 10 年人畜发展规划，根据这一规划结合反复蓄水及重复利用次数提出人畜饮水用水需要的水窖数量尺寸、形式。

灌溉用水规划设计包括对应合理的节水灌溉方法的选定，对应的用水规划及用水制度的确定，以及配套灌水工程的初步设计。

4.2.6　工程建设投入产出分析

估算工程建设的投入、效益，进行投入产出分析计算，并确定国家、地方、群众的投入费用分担情况。

4.2.7　工程实施的规划

工程实施规划主要包括工程实施机构建设、责任合同的签订、项目资金管理、工程前期准备、示范园区建设等。

4.3　雨水集蓄利用工程设计与施工

4.3.1　集流工程

集流工程是为雨水集蓄利用提供水源的工程，包括为集中和收集降雨形成的径

流而修建的集流面、截流沟、汇流沟和把水送到蓄水工程去的输水渠等几个部分。初期的集流场主要是利用公路、场院等透水性较低的生产和生活设施表面，近年来专门建设的以提高雨水聚集能力为目的的集流场日益增多，特别是黄土高原地区，由于地表土层渗透系数大，垂直节理发育，集流场地表处理技术愈来愈受到人们的重视。

4.3.1.1 集流面材料种类及选择

集流面工程材料选择应遵循因地制宜、就地取材、提高集流效率、降低工程造价的原则，合理地选择集流场及集流面材料。

在遵循上述原则基础上，根据各实施区的实际地形、每户的人口情况，充分利用每户（或每窖）周围的道路、庭院、打谷场等集水条件，重点以已有的道路为主，就地而设，也可采用集水场和屋顶等收集雨水，最大限度收集天然降水。集流场主要有混凝土、水泥瓦、水泥土、塑料薄膜、塑料膜上覆砂、机制瓦、小青瓦、原土夯实、沥青路面、自然土坡、闲置地集雨及混合材料等多种类型。

解决人畜饮水及发展庭院式经济灌溉的集流工程，可集蓄屋面径流雨水或庭院径流雨水，当现有屋面为瓦屋面或水泥屋面时，应尽量加以充分利用；当现有屋面为草、泥时，宜改建成瓦屋面或水泥屋面，并优先采用水泥石棉瓦，不足部分可收集庭院内径流雨水，若现有庭院雨水处理形式还不能满足集雨要求，可通过用混凝土改造或处理庭院以补充不足；在空闲庭院可铺设塑料薄膜或铺瓦以作为集流面。

用于发展大田作物灌溉的集流面工程，应优先考虑临近现有的集流面，如沥青公路路面、水泥路面、农村道路、场院及天然土坡及短期径流水等集流面或集流场所。现有集流面集水量不足时，可修建人工防渗集流面以作为补充处理。

修建人工防渗集流面时，在沙石原料丰富的地方，宜优先采用混凝土集流面。

在人均耕地较多且采用土地轮休办法的地区，可选用塑料薄膜覆盖耕地作为集流面。为了提高塑料薄膜使用寿命，宜对地面进行处理后铺设。并且对轮耕区铺设时要注意除满足本季节集水要求的前提下，还要便于集流面转换时收起。

在小流域治理区或荒坡便于利用地区，可结合小流域治理，利用荒山荒坡作为集流面，并按一定间距修建截流沟和输水沟，把水引入蓄水池或修建谷坊塘坝阻拦蓄雨。

在上述各种形式之外，如果蓄水窖附近还有可利用的水源，为充分利用这些水源，调节其时空分布，可修建与之连接的管道或渠道，以提高窖的保证率和利用率。

集流工程建设时，尽量使窖底满足一定的高程要求，使灌溉地块与池底存在一定高差，满足自流灌溉或各种灌水方式下的压力要求，以减小能耗。

4.3.1.2 集流面积计算

（1）降雨资料的收集与计算

当地降雨量的多少关系到集流场面积的确定和工程造价问题。由于各地自然地

理和气象条件的不同，降雨量差别很大，应从当地水文气象部门那里收集。

（2）灌溉用水量的确定

尽量收集当地或类似地区不同作物的灌溉用水量资料，资料缺乏时，可采用公式进行估算，用水保证率按 75%进行设计。

（3）集流场面积的确定

由集水量推求集流面积公式为：

$$S=1000\frac{W}{R_P E_y} \tag{4-7}$$

$$R_P=KP_P \tag{4-8}$$

$$P_P=K_P P_0 \tag{4-9}$$

式中　S——集流面积，m^2；

P_P——用水保证率等于 P 时的降水量，mm；

E_y——用水保证率等于 P 时的集流效率，当地试验资料缺乏时，可参考表 4-5 选用；

W——保证率等于 P 的年份全年需水量，m^3；

R_P——保证率等于 P 的全年降雨量，mm，从当地水文气象资料查得，也可按照式（4-8）、式（4-9）计算；

P_0——多年平均降水量，mm，由气象资料确定；

K_P——根据保证率及 C_v（变差系数）值（可由表 4-6 查取）确定的系数，用小数表示，可从气象部门查得；

K——全年降雨量与降水量的比值，可根据气象资料确定。

表 4-7 及表 4-8 分别是人畜饮水雨水集流工程单位集水量所需集流面面积表和集雨灌溉及家庭养殖雨水集流工程单位集水量所需集流面面积表，实际应用中，当已知供水量后，可按这两表计算需要的集流面积。计算时，应根据当地的多年平均降雨量和降雨量年际变差系数 C_v，查得每立方米集流量所需某种集流面的面积，再乘以供水量，即得到该种集流面的面积。表中列出了为生活供水的雨水集蓄工程中几种常用的集流面，当所选的集流面形式不在表中所列时，可参考表中数值并结合地方经验选取。当工程所在地的降雨量及 C_v 值不在表中所列时，可采用直线内插的方法查得。

表 4-6　建设集雨工程的地区降雨变差系数表

变差系数 C_v	地　区　名　称
≤0.2	除重庆和四川部分地区外西南各省（区）
0.2～0.25	成都、重庆、浙江沿海、河南西部、陕南、陇南等
0.25～0.3	甘肃中东部、青海东部、宁南山区、山西南部、陕西中部、山东大部等
0.3～0.4	内蒙古自治区、河北大部、山西及陕西北部

表 4-7 人畜饮水雨水集流工程每立方米集水量所需流面面积 单位：m^2

C_v	降雨量/mm	混凝土	HEC 土	水泥瓦	机瓦	手工瓦	土场院
0.20	250	7.0	6.9	8.2	13.3	17.8	35.6
	300	5.8	5.5	6.5	10.3	13.9	24.7
	350	4.8	4.7	5.4	8.3	11.2	18.1
	400	4.1	4.0	4.5	6.8	9.3	13.9
	450	3.6	3.2	3.8	5.7	7.8	11.0
	500	3.1	3.0	3.3	4.8	6.7	8.9
	600	2.6	2.5	2.7	3.9	5.3	6.5
	700	2.2	2.1	2.3	3.9	4.4	5.3
	800	1.9	1.8	2.0	2.9	3.8	4.4
0.25	250	7.6	7.3	8.8	14.3	19.0	38.1
	300	6.2	6.0	7.0	11.1	14.9	26.5
	350	5.2	4.9	5.7	8.9	12.0	19.4
	400	4.4	4.2	4.8	7.3	9.9	14.9
	450	3.8	3.5	4.1	6.1	8.4	11.8
	500	3.4	3.3	3.6	5.2	7.1	9.5
	600	2.7	2.6	2.9	4.2	5.7	7.0
	700	2.3	2.2	2.5	3.5	4.7	5.7
	800	2.0	1.9	2.1	3.1	4.1	4.7
0.30	250	8.3	8.1	9.6	15.6	20.8	41.7
	300	6.8	6.5	7.7	12.1	16.3	28.9
	350	5.7	5.5	6.3	9.7	13.1	21.3
	400	4.8	4.5	5.3	8.0	10.9	16.3
	450	4.2	4.1	4.5	6.7	9.1	12.9
	500	3.7	3.5	3.9	5.7	7.8	10.4
	600	3.0	2.8	3.2	4.6	6.2	7.7
	700	2.5	2.4	2.7	3.8	5.2	6.2
	800	2.2	2.1	2.3	3.4	4.4	5.1
0.35	250	9.1	8.9	10.5	17.1	22.8	45.5
	300	7.4	7.2	8.4	13.2	17.8	31.6
	350	6.2	6.1	6.9	10.6	14.3	23.2
	400	5.3	5.0	5.8	8.7	11.9	17.8
	450	4.6	4.5	4.9	7.3	10.0	14.0
	500	4.0	3.8	4.3	6.2	8.5	11.4
	600	3.3	3.2	3.6	5.2	7.1	9.2
	700	2.9	2.8	3.0	4.4	5.9	7.4
	800	2.5	2.4	2.7	3.9	5.2	6.3
0.40	250	10.0	9.7	11.6	18.8	25.1	50.1
	300	8.1	7.8	9.2	14.6	19.6	34.8
	350	6.8	6.5	7.6	11.7	15.8	25.6
	400	5.8	5.6	6.4	9.6	13.1	19.6
	450	5.0	4.8	5.4	8.0	11.0	15.5
	500	4.4	4.2	4.7	6.8	9.4	12.5
	600	3.7	3.5	3.9	5.7	7.8	10.1
	700	2.2	2.1	3.4	4.9	6.5	8.1
	800	2.0	1.9	2.9	4.3	5.7	6.9

注：1. 表中的集流面形式是人畜饮水雨水集流工程中几种常用的集流面形式，当所选的集流面形式不在表中所列，可参考表中数值并结合地方经验选取；

2. 人畜饮水雨水集流工程保证率为 90%；

3. 当工程所在地的降雨量及 C_v 值不在表中所列时，可采用线性内插的方法求得。

表 4-8　集雨灌溉及家庭养殖用雨水集流工程每立方米集水量所需集流面积　单位：m^2

C_v	年降雨量/mm	混凝土（或 HEC 土）	水泥瓦	机制瓦	手工瓦	土路面、场院	良好沥青路面	裸露塑料薄膜	自然土坡
0.20	250	6.2	7.2	11.6	15.5	31.0	6.6	5.5	58.3
	300	5.0	5.7	9.0	12.1	21.5	5.4	4.5	41.1
	350	4.2	4.7	7.2	9.8	15.8	4.5	3.8	30.2
	400	3.6	3.9	5.9	8.1	12.1	3.8	3.3	23.9
	450	3.1	3.4	5.0	6.8	9.6	3.3	2.9	19.0
	500	2.7	2.9	4.2	5.8	7.8	2.9	2.6	15.5
	600	2.2	2.4	3.4	4.6	5.7	2.4	2.1	10.8
	700	1.9	2.0	2.9	3.9	4.6	2.0	1.8	7.9
	800	1.6	1.7	2.5	3.3	3.8	1.7	1.6	6.1
0.25	250	6.5	7.5	12.2	16.3	32.5	7.0	5.7	60.8
	300	5.3	6.0	9.5	12.7	22.6	5.6	4.7	43.1
	350	4.4	4.9	7.6	10.2	16.6	4.7	4.0	32.2
	400	3.8	4.1	6.2	8.5	12.7	4.0	3.5	24.9
	450	3.3	3.5	5.2	7.1	10.0	3.5	3.0	19.9
	500	2.9	3.0	4.4	6.1	8.1	3.0	2.7	16.2
	600	2.3	2.5	3.6	4.8	6.0	2.5	2.2	11.3
	700	2.0	2.1	3.0	4.1	4.8	2.1	1.9	8.3
	800	1.7	1.8	2.6	3.5	4.0	1.8	1.7	6.3
0.30	250	6.8	7.9	12.8	17.1	34.2	7.3	6.0	63.8
	300	5.6	6.3	9.9	13.4	23.7	5.9	5.0	45.2
	350	4.6	5.2	8.0	10.8	17.4	5.0	4.2	33.7
	400	4.0	4.3	6.5	8.9	13.4	4.2	3.6	26.1
	450	3.4	3.7	5.5	7.5	10.6	3.7	3.2	20.8
	500	3.0	3.2	4.7	6.4	8.5	3.2	2.8	17.0
	600	2.5	2.6	3.7	5.1	6.3	2.6	2.3	11.8
	700	2.1	2.2	3.2	4.3	5.1	2.2	2.0	8.7
	800	1.8	1.9	2.8	3.6	4.2	1.9	1.7	6.6
0.35	250	7.1	8.2	13.4	17.8	35.7	7.6	6.3	66.8
	300	5.8	6.6	10.4	13.9	24.8	6.2	5.2	47.4
	350	4.8	5.4	8.3	11.2	18.2	5.2	4.4	35.4
	400	4.4	4.5	6.8	9.3	13.9	4.4	3.7	27.4
	450	3.6	3.9	5.7	7.8	11.0	3.8	3.3	21.8
	500	3.1	3.3	4.9	6.7	8.9	3.3	2.9	17.8
	600	2.6	2.8	4.1	5.6	7.2	2.8	2.4	12.4
	700	2.2	2.4	3.5	4.7	5.8	2.4	2.1	9.1
	800	2.0	2.1	3.0	4.1	4.9	2.1	1.8	7.0
0.40	250	7.5	8.7	14.1	18.8	37.7	8.1	6.6	70.6
	300	6.1	6.9	10.9	14.7	26.7	6.5	5.4	50.1
	350	5.1	5.7	8.8	11.9	19.2	5.5	4.6	37.4
	400	4.4	4.8	7.2	9.8	14.7	4.6	4.0	28.9
	450	3.3	4.4	6.0	8.3	11.6	4.0	3.5	23.1
	500	3.8	3.5	5.1	7.1	9.4	3.5	3.1	18.8
	600	2.8	2.9	4.3	5.9	7.6	2.9	2.6	13.1
	700	2.4	2.5	3.7	4.9	6.1	2.5	2.2	9.6
	800	2.1	2.2	3.2	4.3	5.2	2.2	1.9	7.4

注：1. 表中的集流面形式是集雨灌溉及家庭养殖用水集流工程中常用的集流面形式，当所选的集流面形式不在表中列时，可参考表中数值并结合地方经验选取；

2. 集雨灌溉及家庭养殖用雨水集流工程保证率为 75%；

3. 当工程所在地的降雨量及 C_v 值不在表中所列时，可采用线性内插的方法求得；

4. 表中的自然土坡是指植被稀少时的自然土坡。

4.3.1.3 **集流面施工技术要点**

（1）混凝土集流面　工程施工前，对地基进行翻土夯实处理，翻夯层厚度以30cm为宜，夯实干容重不应小于1.5g/cm³。在有砂石料的地区，可把河卵石、小块石掺入地基内，再按横向坡度1/10～1/50，纵向坡度1/50～1/100的要求浇筑混凝土集流面。

混凝土集流面宜采用C15混凝土现浇，厚度3～5cm，配合比可参照表4-20选定。砂石料的含泥量不大于4%并不得用矿化度大于2g/L的水拌和。分块尺寸以1.5m×1.5m～2.0m×2.0m为宜，块间缝宽1.0～1.5cm，缝间填塞及处理如图4-2所示。伸缩缝至少应与混凝土厚度相等齐平。

混凝土集流面养护要求：集流工程中所有混凝土工程和砂浆工程要求在初凝后覆盖麦草或草帘、草袋等物洒水养护7天以上。若在夏季施工时，每天洒水不少于4次，保证覆盖物潮湿。

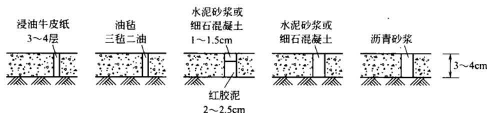


图4-2　混凝土集流面伸缩缝

（2）片（块）石衬砌集流面

施工时应根据片（块）石的大小和形状，在厚度不小于5cm情况下，采用竖向砸入或水平铺垫。水平铺垫时地基或基础处理方法及要求同混凝土集流面基础处理，即处理深度不小于30cm，干容重不小于1.5g/cm³。

（3）塑料薄膜防渗集流面

塑料薄膜防渗集流面可分为裸露式和埋藏式两种。塑料薄膜集流面铺设前，要对基础进行处理，要铲除杂草，整平集流面，并进行适当的夯实，夯实程度以人不落陷为宜。裸露式集流面是直接将塑料薄膜铺设在修整完好的地面上；埋藏式集流面按可采用草泥、细沙等覆盖，厚度以4～5cm为宜。覆盖草泥的施工应铺盖均匀、压实和拍光，将细砂也应摊铺均匀。裸露式塑料薄膜铺设后四周及表面适当部位宜用砖块、石块或木条等压实。接缝可搭接10cm，用恒温熨斗焊接，或搭接30cm后折叠止水。折叠搭接塑料薄膜的止水缝应使水流不能冲开，即缝隙高茬处于集水上游位置。部分地区可采用此种方法利用日光温室或大棚的棚面集水补充灌溉。

（4）土质道路集流面

需进行路面整平并设置向路边排水的横向坡度，修筑合适的拦截及导引工程，

并保证水流通畅，不能有杂草及杂物堵塞。

（5）沥青路面集流面

沥青路面通常为双向分水即沥青路面的中间较高，因而集流面是沥青路面的单侧或一半，沥青路边需要对路肩进行处理，在路基下需要修筑导引及拦截工程，保证水流通畅。

（6）瓦屋面

瓦屋面集流雨水的施工可按当地农村房屋建设的实际情况和要求进行，瓦片之间要搭接良好，坡度适中，屋檐处应设滴水或在檐下设置集雨水槽，便于雨水的导引容蓄。

（7）空闲地及梯田集水工程

在黄土高原区，可将不能耕种的闲空地充分地利用起来，并根据闲空地适当选择处理方法，建立人工集流面，集蓄有限的自然降水。

梯田面积大的地区，可以适当利用部分可耕梯田作为集流场，以达到充分用水的目标。

（8）自然坡面集流面的化学材料处理

目前主要有钠盐、石蜡、沥青、聚硅氧烷、有机硅和土壤稳定剂与防蚀剂等。钠盐可以破坏土壤结构，使土壤黏粒充塞土壤孔隙，在土壤表面形成致密层以降低土壤入渗率，所以，一般在土壤黏粒含量＞10％的土壤上使用效果理想。石蜡、沥青、聚硅氧烷及 YJG-1 可直接阻塞土壤孔隙，降低入渗。土壤稳定剂和防蚀剂曾被用于公路修筑中以减轻沥青-土壤界面上水的剥蚀作用，可增强土壤的稳定性，防止土壤侵蚀，一般与其他材料配合使用，目前可移植于此。

进行化学处理之前，先进行集水区表面的整理，即进行清除、拍光和压实处理，再将化学材料喷洒于土壤表面。钠盐也可与土壤混合使用，土壤稳定剂和防蚀剂既可混入其他材料，也可先喷于地表，再施用其他材料。

应用2％黄原酸盐提前稳定土壤，可将石蜡用量减少到常用量的1/8（0.25kg/m^2），初始径流率可达 90％以上，年平均径流率可达 87％。一般石蜡处理的径流率在48％～90％之间。石蜡处理在恶劣的气候条件下，由于水嵌入石蜡与土壤界面之间，经冻融变化会发生剥落，土壤黏粒含量＞50％时，进行石蜡处理，6 个月即失去作用，沥青处理与石蜡处理有同样的问题。

钠盐处理集水区表面用 44.9g/m^2 的 Na_2CO_3 处理，初始径流率为 81％，平均径流率为 46％，随时间推移，分散黏粒的迁移，径流率明显下降，3 年之后不再有效果。如果将 1120g/m^2 NaCl 混入土壤使用，平均径流率可达 80％，可延长寿命。钠盐处理径流普遍在 25％～80％之间，重复处理之后可达 96％，水质对盐水处理的径流率有影响，用蒸馏水比自来水径流率高，但盐处理对径流水质会有影响，在处理后的径流中 Na^+ 含量略高一点。

以 0.22kg/m^2 聚硅氧烷配制成 3％的溶液与 2％的黏结剂混合使用，其径流率

初值为90%以上，160周之后为50%，使用聚硅氧烷后径流率平均在85%～95%之间，之后有的处理降低到25%。

有机硅是近几年所报道的最新材料，在拍光、压实的坡面上喷洒一层厚度约0.1mm左右的高分子化合物有机硅溶液，坡面产流率可达80%～90%以上。

以上几种材料的效果见表4-9。

表4-9 几种化学材料处理集水区表面的效果对比

材料种类		用量/%	产流率初值/%	平均产流率/%	有效年限/年
石蜡+2%防蚀剂		250.0	>90	87	7
Na盐	喷洒溶液	44.9	>81	46	3
	混合土壤	1120.0		80	
聚硅氧烷+2%黏结剂		220.0	>90	50	>4
YJG-1		150.0	95	80～90	5

（9）固化土集流面

固化土施工工艺与混凝土类同，既可进行浇铸方式施工，也可碾压施工。西北农林科技大学水土保持研究所在甘肃定西现场试验工程中，采用黄土掺铺碾压夯实施工法，成型厚度为5cm。1998年施工后场面粗糙，影响了集流效果。1999年经过室内试验，将粗糙的表面变为平滑面后，大大提高了集流效果。笔者对HEC固化剂固化杨凌黄土进行研究，结果表明采用配合比为HEC：土=1：8为最好，施工中最优含水率为16%～19%。1：8型HEC固化土室内试验结果见表4-10。

表4-10 1：8型HEC土室内试验结果

固结强度（7天泡水无侧限抗压强度）	软化系数	水中养护强度	14天的干缩值/(cm/s)	耐久性		抗硫酸盐及碳酸盐侵蚀系数	集流效率/%
				抗渗等级	抗冻等级		
3～15MPa	>0.95	随试件龄期稳定增长	5×10^{-4}（同条件下水泥固结体为200×10^{-4}）	$>S_4$	$>D_{25}$	>0.98	75～90

4.3.2 截流输水工程

4.3.2.1 截流输水工程布置

当集流面在长度方向尺寸较大，或离蓄水工程距离较远时，应修建输水沟渠把水送到蓄水工程中。由于地形条件、集雨场位置和防渗材料的不同，通常有以下几种形式。

① 利用屋顶作集流面时，可将截流输水沟布置在屋檐落水下的地面上，采用C15混凝土宽浅式或弧形断面渠道，20cm×20cm的混凝土矩形渠，开口20～

30cm 的 U 形渠道，砌砖、砌石的暗渠和无毒 PVC 塑料管。

② 利用公路作为集流面，可利用公路的排水沟，截流输水工程将公路排水沟与蓄水设施相连接。

③ 利用天然山坡作为集流面时，可每隔 20～30m 沿等高线修建一定的截流沟，截流沟修成土质渠道，坡度宜为 1/30～1/50。截流沟与输水沟连接，输水沟通常沿垂直等高线方向布置，并采用矩形或 U 形混凝土衬砌渠道。

4.3.2.2　截流输水工程断面设计

引水断面形式可以是 U 形、矩形、梯形和半圆形等，断面尺寸可根据集流量及沟底坡度等因素按明渠均匀流公式进行确定。

$$Q=AC\sqrt{Ri} \tag{4-10}$$

$$R=A/\chi \tag{4-11}$$

$$C=\frac{1}{n}R^{1/6} \tag{4-12}$$

式中　Q——设计条件下沟（渠）过水流量，m^3/s；

A——过水断面面积，m^2；

i——渠底坡度；

R——水力半径，m；

χ——湿周，m；

C——谢才系数；

n——糙率，可按表 4-11 查取。

由于截流输水工程均是顺坡而建，渠底坡度一般比较陡，故对其不冲流速的校核尤为重要。表 4-12～表 4-14 分别给出了土渠、岩石渠道和护面渠道的不冲流速，设计时可参考。

4.3.3　蓄水工程

蓄水工程是雨水集蓄利用工程的主要建筑物，是蓄存雨水的储水主体，它的优劣直接影响雨水集蓄利用工程的成败及其效益的发挥。蓄水工程的设计施工应当贯彻“因地制宜、安全可靠、技术先进、经济合理”的原则；应当根据地形、土质、集流方式、用途等具体条件进行整体规划布局，选择合理的结构形式和适宜的防渗体。

4.3.3.1　蓄水工程形式选择

蓄水工程种类繁多，主要有水窖、水窑、水池和水罐 4 种。由于水窖建造容易、使用方便、蒸发渗漏少、水质基本不受污染，因而在干旱半干旱黄土地区得到了比较广泛的应用。

表 4-11 渠床糙率系数值

渠道类型	流量范围/(m^3/s)	渠槽特征	糙率系数 n	
			灌溉渠道	退泄水渠道
土渠	>20	平整顺直,养护良好	0.020	0.0225
		平整顺直,养护一般	0.0225	0.025
		渠床多石,杂草丛生,养护较差	0.025	0.0275
	20~1	平整顺直,养护良好	0.0225	0.025
		平整顺直,养护一般	0.025	0.0275
		渠床多石,杂草丛生,养护较差	0.0275	0.030
	<1	渠床弯曲,养护一般	0.025	0.0275
		支渠以下的固定渠道	0.0275	0.030
		渠床多石,杂草丛生,养护较差	0.030	0.035
石质渠道	渠道表面的特征		糙率系数 n	
	经过良好修整		0.025	
	经过中等修整,无凸出部分		0.030	
	经过中等修整,有凸出部分		0.035	
	未经修整,有凸出部分		0.035~0.045	
护面渠道	护面类型		糙率系数 n	
	混凝土	抹光的水泥砂浆面	0.012~0.013	
		金属模板浇筑,平整顺直,表面光滑	0.012~0.014	
		刨光木模板浇筑,表面一般	0.015	
		表面粗糙,缝口不齐	0.017	
		机械浇筑表面光滑的沥青混凝土护面	0.012~0.014	
		预制板砌筑	0.016~0.018	
		平整的喷浆护面	0.015~0.016	
		波状断面的喷浆面	0.018~0.025	
		不平整的喷浆面	0.017~0.018	
	水泥土	平整,表面光滑	0.014~0.016	
		平整,表面粗糙	0.016~0.018	
	素土 黏砂混合土 膨润混合土 灰土、三合土 四合土	平整顺直,养护良好	0.0225	
		平整顺直,养护一般	0.025	
		平整顺直,养护较差	0.0275	
		平整,表面光滑	0.015~0.017	
		平整,表面粗糙	0.018~0.020	
	砌石	浆砌料石,石板	0.015~0.023	
		浆砌块石护面	0.020~0.025	
		干砌块石护面	0.025~0.033	
		干砌卵石护面,表面光滑	0.025~0.0325	
		干砌卵石护面,表面一般	0.0275~0.0375	
		干砌卵石护面,表面粗糙	0.0325~0.0425	

表 4-12　黏性土质渠道允许不冲流速

土壤名称	不冲流速/(m/s)	备　注
轻壤土	0.60～0.80	①土壤干密度 γ=1.3～1.7g/cm³；②表中数据为水力半径 R=1.0m 的情况，当 $R \neq 1.0$m 时，表中所列数据乘以 R^{a} 即为不冲流速。对疏松的砂质土、壤土及黏土 a=1/4～1/5
中壤土	0.65～0.85	
重壤土	0.70～1.00	
黏　土	0.75～0.95	

表 4-13　岩石渠道允许不冲流速　　单位：m/s

岩　性	水　深/m		
	0.4	1.0	2.0
砾岩、泥灰岩、页岩	2.0	2.5	3.0
石灰岩、致密的砾岩、砂岩、白云石灰岩	3.0	3.5	4.0
白云砂岩、致密的石灰岩、硅质石灰岩、大理岩	4.0	5.0	5.5
花岗石、辉绿岩、玄武岩、安山岩、石英岩、斑岩	15.0	18.0	20.0

表 4-14　护面渠道允许不冲流速

护面类别	允许不冲流速/(m/s)
黏土、黏砂混合土	0.75～1.00
灰土、三合土、四合土	<1.00
现场填筑水泥土	<2.5
预制铺砌水泥土	<2.0
干砌卵石	2.5～4.0
单层浆砌块石	2.5～4.0
双层浆砌块石	3.5～5.0
浆砌料石	4.0～6.0
浆砌石板	2.5
轻质砂壤土保护层膜料防渗	<0.45
中壤土保护层膜料防渗	<0.60
重壤土保护层膜料防渗	<0.65
黏土保护层膜料防渗	<0.70
砂砾料保护层膜料防渗	<0.90
场浇筑沥青混凝土	<3.0
预制铺砌沥青混凝土	<2.0
现场浇筑混凝土	<8.0
预制铺砌混凝土	<5.0
喷射法施工混凝土	<10.0

注：表中土料护面和膜料护面允许不冲流速值为水力半径 R=1.0m 的情况；当 $R \neq 1.0$m 时，表中所列数值应乘以 R^{a}。指数 a 可按如下采用：①疏松的壤土、黏土 a=1/3～1/4；②中等密实的壤土、黏土 a=1/4～1/5。

蓄水工程形式应根据地形、土质、集流方式、建筑材料、蓄水用途、社会经济和当地群众的经验与习惯等因素确定。当土质为黏质黄土且蓄水工程容积较小（一般在 60m³ 以下），蓄存雨水主要用作人畜饮水时，可选择水窖形式；土质砂性较好或土中节理发育，或蓄水容积较大时，一般选用蓄水池；在适宜的低洼地形，拦蓄坡耕地及土路面上含沙量较大的洪水时，可选用涝池或塘坝。选择蓄水工程的形式时，应当考虑以下原则：

① 用于人畜饮水的蓄水工程，应尽量采用水窖或采用与地面在同一高程的带顶盖的水池，或采用建在楼房内的水池；

② 土质地区修水窖一般要比建水池便宜，有条件时可采用水窖，如果在土质地区蓄水容积大于 100m³，或在岩石地区蓄水容积大于 30m³ 时，宜采用水池。

4.3.3.2 蓄水工程位置确定

选址应综合考虑集流、灌溉和建窖土质三个方面，一般应具备下列条件。

① 蓄水窖要选择在有较大来水面积和径流集中的地方。

② 蓄水窖设在灌溉农田附近，引水、取水都比较方便的位置。山区应充分利用地形高差多建自流灌溉窖。

③ 要有深厚坚硬的土层，以质地坚硬、均一、黏结性强的胶土最好，硬黄土次之。

④ 要有良好的地形和环境条件：蓄水窖应远离裂缝、陷穴、沟头、沟边，靠近坡脚的窑窖要选在 3m 以上坡体的下部。要注意距离树木、房屋等建筑物有一定距离，以免树根损坏窑壁；吃水水窖远离纳污水体等污染源，以保证饮水清洁卫生。

⑤ 要尽可能地临近井、渠、涝池和抽水站等水利设施，余缺互济，增加水窖重复蓄水次数，充分利用水资源。

⑥ 利用公路作为集流场时，蓄水工程位置应符合公路部门有关标准要求。一般蓄水工程应距离公路一定距离：国道≥20m，省道≥15m，县道≥10m。

4.3.3.3 水窖容积确定

影响水窖容积的主要因素有地形、土质条件、使用要求以及当地经济水平和技术能力等。应当根据设计年降雨量、集水面积、集流效率确定水窖容积。容积过大造成浪费，过小则使收集的雨水盛不下而流失同样是浪费。

（1）根据地形土质条件确定水窖容积

水窖作为地下集水建筑物，其容积大小直接受当地地形条件和土质条件制约，当土质为质地密实、坚硬的红胶土和硬黄土时，其容积可适当大一些；当土质比较疏松时，如砂土、黄绵土等，水窖容积不宜过大，一些地方因土质过差不宜建窖。

（2）根据使用要求选择水窖类型和容积

人畜饮水的水窖大都采用传统的缸式水窖、瓶式水窖，其容积一般为 15～30m³。一般尺寸为水窖深度等于旱窖深度等于水旱窖连接处的直径，这种水窖称为“三头相等窖”，经久耐用，防渗性能好。

用于农田灌溉的水窖一般要求容积较大，水窖内壁需要采取加固措施。常用的类型为水泥薄壁水窖和蓄水池，其容积一般为 50～100m³。在土质条件好的崖面可修建窑式水窖，这种水窖施工方便，投资省，容积一般为 50～100m³，个别容积达数百立方米。

（3）根据当地经济水平和投入能力确定水窖容积

水窖的类型和容积不同，建窖成本差异很大。各地的建筑材料价格各异，不同类型其建材用量又各不相等。因此，修建水窖要选择适宜的窖型和容积，又要考虑当地政府的投入和农户经济状况。水窖容积确定可参考表 4-15。

表 4-15　水窖容积参考值

土质条件	适宜水窖类型	建窖容积/m^3
土质条件好的红土、硬黄土地区	传统土窖	20～40
	水泥薄壁窖	40～80
	窑窖	50～100
土质条件一般的壤土区	水泥薄壳窖	30～50
土质疏松的砂土区	不宜建窖，宜建蓄水池	50～100

4.3.3.4　传统土窖

（1）结构尺寸与形式

传统土窖归纳起来分为缸式窖与瓶式窖，如图 4-3、图 4-4 所示。传统土窖由窖筒、旱窖、水窖和窖底四部分组成。在松散黄土上的水窖，一般都是两头小、中间大，符合“丈二三头相等”的窖型规格，在密实的土质上，除上述形式外，还有随深度直径一直扩大的，如河南济源采用的旱井。

传统水窖的窖筒直径宜为 0.6～0.8m，筒深不小于当地最大冻土深度，同时不小于 1.5m，随深度扩展应是连续曲线，坡度宜为 1∶0.6～1∶0.9，中部以下的收缩部分坡度以 1∶0.1～1∶0.125 为宜，蓄水深度宜为 3m 以下，不大于 5m。缸式土窖的尺寸可按公式（4-13）或参考表 4-16 拟定，瓶式水窖的尺寸可按公式（4-14）或参考表 4-17 拟定。

$$V=\frac{1}{12}\pi H_1(D_1^2+D_2^2+D_1D_2)+\frac{\pi}{12}H_2(D_2^2+D_3^2+D_2D_3) \tag{4-13}$$

式中　V——缸式水窖的容积，m^3；

D_1——窖筒直径，m；

D_2——中径，亦称散盘直径，m；

D_3——窖底直径，m；

H_1——旱窖深度，m；

H_2——水窖深度，m。

表 4-16　缸式水窖几何尺寸、工程量及材料表

容积/m^3	主要尺寸/m					工程量				材料量				
	D_1	H_1	D_2	H_2	D_3	胶泥/m^3	混凝土/m^3	挖土/m^3	砌砖/m^3	水泥/kg	砂子/m^3	石子/m^3	白灰/m^3	砖/块
15	0.5	2.5	2.5	2.5	1.9	0.91	0.38	17.1	0.8	120	0.2	0.3	220	400
25	0.6	3.5	2.9	3.5	2.1	1.44	0.38	26.9	0.8	120	0.2	0.3	245	400
30	0.6	3.5	3.0	4.0	2.2	1.62	0.38	31.9	0.8	120	0.2	0.3	290	400

$$V=\pi H_1^2\left(\frac{D_2}{2}-\frac{H_1}{3}\right)+\frac{1}{12}\pi H_2(D_2^2+D_3^2+D_2D_3) \tag{4-14}$$

式中 V——瓶式水窖容积，m^3；

H_1——旱窖深度，m；

H_2——水窖深度，m；

D_2——散盘直径，m；

D_3——窖底直径，m。

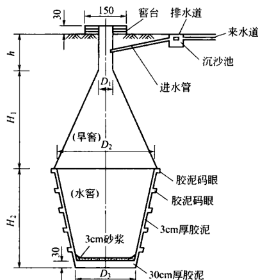


图 4-3 缸式传统土窖示意图（单位：cm）

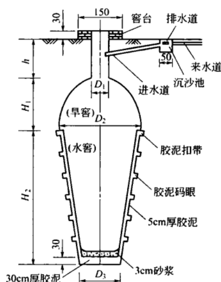


图 4-4 瓶式传统土窖示意图（单位：cm）

表 4-17 瓶式水窖技术数据表

容积 /m³	主要尺寸/m					工程量				材料量				
	D_1	H_1	D_2	H_2	D_3	胶泥 /m³	混凝土/m³	挖土 /m³	砌砖 /m³	水泥 /kg	砂子 /m³	石子 /m³	白灰 /m³	砖 /块
15	0.5	1.5	2.5	4.0	1.5	1.16	0.18	15.9	0.8	80	0.15	0.15	240	400
25	0.6	2.0	3.0	5.0	1.6	1.71	0.20	27.3	0.8	100	0.15	0.16	270	400
30	0.6	2.0	3.5	6.0	1.8	2.23	0.25	42.0	0.8	120	0.20	0.20	320	400

（2）防渗措施

砂石缺乏的地区，采用传统的红胶泥窖壁防渗，防渗材料以砂料：粉粒：黏粒=1:2:1较好；捶窖后红胶土的干容重应在 1.7g/cm³ 以上，防渗层的厚度可采用上部 3cm、中部 3cm、下部 4cm、底部 5～6cm；为了增加防渗层与原土的结合应在旱窖与水窖连接处将红泥呈圆环状内插黄土，称之“散盘”或扣带，同时在水窖壁应挖码眼，其间距 30cm，口水平长 6cm，垂直宽 4cm，深 15cm，往里向下倾斜，呈梅花形分布。

（3）适用范围

这是广泛分布于土质较为坚硬、密实的红、黄土地区的一种最为重要的普通水窖，适合于砂石料缺乏，经济条件差，采用水泥砂浆防渗有困难的干旱山区人饮工程。土质较差时宜用缸式水窖，土质较好时宜用瓶式水窖。

（4）施工技术要点

红胶泥水窖的施工，主要分为挖窖、钉窖、捶窖 3 个步骤。

① 挖窖　窖址选好后，按设计尺寸进行开挖，当旱窖挖到位时，应先将旱窖与水窖接合的扣带挖好，然后水窖部分与码眼同时挖，扣带沿窖壁一周，深 15cm，口宽 10cm，在扣带内每隔 20cm 打一圈码眼，窖壁上的码眼应呈梅花形分布，间距 30cm，深 15cm，口径 6～10cm，码眼口小里大。

② 钉窖　开始和泥前，首先要作泥样试验，即拌和少许胶土成泥，塑一口小碗，盛水一昼夜，若泥碗不裂缝、不漏水、不变形，说明符合质量要求，可以直接和泥钉窖。如果泥碗被溶解破坏，说明胶泥砂性大，可以加些石灰；泥碗裂缝，即黏性太大，可以加些黄土。这样反复试验，即可确定出掺和石灰或黄土的比例。然后按比例和泥，在和泥之前，将胶土晒干，打碎过筛，加水浸泡 1～2 天使之充分吸水软化，然后用脚踩踏，或用木棍、木锤等细捶细捣，直到胶泥软硬适中即可钉窖。钉窖时，先将水、旱窖结合扣带钉好，然后把泥做成长 20cm、直径 10cm 的泥棒，和直径 15cm、厚 4cm 的圆形泥饼，先将泥棒蘸水塞进码眼内，码眼口部小内部大，要注意塞头，保持泥棒在窖壁上外露 3cm，再把泥饼蘸水用力粘到各泥棒之间，并均匀压平，使泥棒和泥饼成为一体，保持其厚度均达到 3cm，自下而上直到窖底，窖底厚度一般要保证在 5～6cm 之间。

③ 捶窖　钉窖完成后，要盖好窖口，阴干一两天后再用木榔头捶打。捶打时，前五天每天捶一遍，此后两天捶一遍。若第一次捶打时窖壁太黏，可用鞋底粘上草木灰轻按轻捶，要用力均匀，此后一遍比一遍加重。若遇到有膨胀的地方，说明里边已充气，要用小刀划破放气，然后再捶。一直捶到窖壁发亮，听起来发出钢声，滴上水很快向下滑溜为宜，暂时不蓄水，可先倒入几担“养窖水”防止窖壁干裂。

4.3.3.5　水泥砂浆抹面水窖

（1）结构尺寸与形式

水泥砂浆抹面窖，由水窖、旱窖、窖盖组成，如图 4-5 所示。水窖位于窖体下部，是蓄水部分，形似水缸；旱窖位于水窖上部，由窖口经窖筒向下逐渐扩展，经中径后与水窖吻接。

水泥砂浆抹面窖，由于采用砂浆防渗，故缩短了旱窖部分的长度，由传统土窖的 4～5m 缩减为 3m 左右；防渗处理至窖口，且加大了中径尺寸，增加了有效容积。窖口尺寸由 0.5～0.7m 扩大到 1.0m，减轻了上部土体重量，便于施工操作。

水泥砂浆抹面水窖深度 H 一般为 7.0～8.0m，其中水窖深度 4.0～4.5m，旱窖部分深 3.0～3.5m，底径 3.0～3.5m，中径 3.5～4.5m，坡比 1∶0.1～1∶0.125，蓄水量 40～50m³，结构尺寸可按公式（4-13）或参考表 4-18 选定。

表 4-18　水泥砂浆抹面窖技术参考数

容积/m³	主要尺寸/m					工程量			材料量		
	H_2	H_1	D_3	D_2	D_1	砂浆/m³	混凝土/m³	土方/m³	水泥/kg	石子/m³	砂子/m³
45	4.0	3.5	3.0	4.0	1.0～1.2	1.9	1.15	60	1100	1.0	2.6
50	4.5	3.5	3.2	4.2	1.0～1.2	2.3	1.29	70	1300	1.1	3.1

（2）防渗措施

窖底防渗采用在处理好的土基上现浇 C15 混凝土 10cm 或 30cm 红胶泥垫层，水泥砂浆抹 3 遍，每遍厚 1cm，砂浆配比分别为 1∶3.5、1∶3.0、1∶2.5，最后刷水泥浆 2 遍；窖壁防渗处理采用水泥砂浆抹 3 遍，每一遍厚 1cm，最后水泥浆刷 2 遍。为了防渗层与窖壁土层的紧密结合，中径以下部分每隔 1m 设一条 10cm×10cm 的圈带，在两圈带间布设品字形混凝土码眼，如图 4-5 所示。

图 4-5　水泥砂浆抹面窖窖剖面图

（3）适用条件

土质比较密实的红、黄土地区可以采用，含砂较多的砂壤土地区不宜采用。

（4）施工要点

水泥砂浆薄壁窖的窖体，包括水窖、旱窖、窖口和窖盖四部分。窖体施工工序为挖窖筒、墁壁、窖底浇筑、窖体防渗、制作窖盖五个环节。

① 挖窖体　水窖地址和类型尺寸选定后，铲除表土，确定中心点，按选定的窖口尺寸在地面上画一小圆，在圆的范围内向下开挖取土，挖至 1.5m 深左右按图纸设计要求整修上部窖型，在窖深 0.5～0.8m 处开始扩展，窖深 2.5～3.0m 左右，中径达到设计直径（3.8～4.2m）后用铅垂线测量是否垂直，严格检查尺寸，防止窖体中线偏斜。上部窖体一般不蓄水，俗称旱窖。

水窖部分开挖，始终要先从中心点向四周扩展，按设计尺寸要求检查合格后再往下开挖。水窖部分从中径（缸口）开始，每下挖 1.0m，在窖壁上沿等高线挖一条宽 5cm、深 5～8cm 的圈带，在两圈带中间，每隔 30cm 打混凝土柱（码眼），或用长条形坚硬石片（长 8～10cm，直径 4～5cm）钉入窖体内，外露 1cm，品字形布设，第一次墁砂浆时将外露片石盖住。

② 墁壁　窖体按设计尺寸挖好后，清除窖壁和圈带内的浮土，并洒水湿润，用 1∶3.5 水泥砂浆将圈带内填筑后再由下往上墁壁。砂浆厚度 3cm，分两次墁壁。第一次用 1∶3.5 水泥砂浆，粗墁挤压，过 24h 后再用 1∶3 水泥砂浆用铁泥臂（抹面工具）细墁一层（有的地方墁壁三次，每次厚 1cm）。对于打窖技术熟练，但缺少架木的地区，也可采取挖窖筒，墁壁防渗分段同步进行。即每下挖 1～1.5m，检查整修尺寸，合格后墁壁。以圈带处为接茬，但在下挖取土时，要注意防止窖壁上砂浆粘上土，墁壁刷浆前要仔细清洗窖壁。这种施工方法，可节省架木，提高工效和提高防渗质量。

③ 窖底浇筑　窖底防渗是最重要的一环，要严格施工质量。窖底防渗分为胶泥和混凝土两种。处理窖底前要先将底部原状土轻轻夯实，以防止底部发生不均匀沉陷。

a. 红胶泥防渗。先将红黏土打碎过筛，用水浸泡 1～2 天，使之充分吸水软化，并反复翻拌成面团状，然后将泡制好的红胶泥分两层夯实，厚度 30cm。最后用 1∶3 水泥砂浆墁 3cm。此外在窖底要设防冲板，以落水点为中心浇筑 10cm 厚的 C20 混凝土，防冲板面积不小于 $1m^2$。

b. 混凝土防渗。是在处理好的窖底土体上浇筑 10～15cm 厚的 C20 混凝土，最后用水泥砂浆抹面。

④ 窖体防渗　窖壁、窖底的墁壁、浇筑混凝土工序结束一天后，即可进行刷浆防渗。防渗浆采用 425 号水泥加水稀释成糊状，从上到下刷两遍然后将窖口封闭，过 24h 后，洒水养护 14 天左右即可蓄水。为了提高防渗效果，可在水泥中加防渗剂（粉），用量为水泥用量的 3%～5%，第二次墁壁和抹浆时使用，防渗效果显著。

⑤ 制作窖口、窖盖　制作窖盖可与打窖同时进行，按设计尺寸要求就地预制或集中预制。为了便于管理，应在窖盖上刻写蓄水量、编号、施工年月、乡村名称

等。窖盖表面要求平整，不得出现蜂窝、麻面等，浇筑好后覆盖麦草洒水养护 7～14 天。

窖台用砖浆砌或用混凝土预制窖圈，窖台高 30cm 即可，并用水泥砂浆勾好砖缝，再将窖盖安装好。

4.3.3.6 混凝土盖碗窖

（1）适用条件

窖形如图 4-6 所示，这种窖吸收了缸式水窖和瓶式水窖的优点，根据民间旱窖不塌、水窖不坏的经验，废弃不稳定的旱窖部分，克服了窖容不能充分利用的缺点，采用球形顶盖，起到扩容和增加蓄水窖稳定性的作用，该种窖形在土质较黏的黄土地区均可采用。

图 4-6 混凝土盖碗窖窖体结构示意（单位：cm）

（2）结构形式与尺寸

混凝土盖碗窖，由混凝土现浇弧形顶盖，水泥砂浆抹面固壁，现浇混凝土拱底，3∶7 灰土翻夯窖基，砼预制窖颈等 5 部分组成，蓄水窖的坡度宜取 1∶0.1。

砂浆固壁混凝土顶盖窖的尺寸可参考表 4-19 或按式（4-15）确定。

表 4-19 混凝土盖碗窖主要尺寸、工程量及材料用量

容积 m^3	主要尺寸/m			主要工程量/m^3				材料数量			
	D_1	D_2	H	挖方	填方	混凝土	砂浆	水泥/kg	砂子/m^3	石子/m^3	白灰/m^3
15	2.6	1.8	3.9	20.5	3.60	1.12	0.82	630	1.60	0.98	198
20	2.8	2.0	4.4	26.8	4.60	1.29	1.01	750	1.90	1.15	20530
30	3.4	2.6	4.2	38.0	5.20	1.70	1.22	1100	2.30	1.51	215

$$V=\frac{1}{12}\pi H(D_1^2+D_2^2+D_1D_2) \tag{4-15}$$

式中　V——混凝土盖碗窖容积，m³；

H——蓄水窖深度，m；

D_1——上口直径，m；

D_2——下口（窖底）直径，m。

D_1、D_2、H 间应满足式（4-16）

$$\frac{D_1-D_2}{2H}\approx\frac{1}{10} \tag{4-16}$$

（3）防渗措施

混凝土盖碗窖的防渗处理措施与水泥砂浆薄壁窖相同。

（4）混凝土的配合比及材料用量

常用混凝土与砂浆配合比分别见表 4-20 及表 4-21，不同容积混凝土盖碗窖的材料用量见表 4-19。

表 4-20　混凝土常用配比参考表（选用材料：32.5 水泥，卵石，中砂）

混凝土强度等级	水灰比	最大粒径/mm	配合比	每立方米材料用量			
				水泥/kg	砂子/m³	石子/m³	水/kg
C_{15}	0.65	20	1：3.20：4.34	269	0.54	0.73	175
		40	1：3.33：5.67	240	0.53	0.78	156
C_{20}	0.55	20	1：2.53：3.80	312	0.54	0.70	170
		40	1：2.62：4.86	276	0.50	0.79	150
	0.60	20	1：2.70：4.06	287	0.48	0.73	175
		40	1：2.44：4.54	280	0.43	0.79	165

表 4-21　砂浆常用配比参考表

砂浆标号	重量配比	水泥等级	水泥/kg	砂/m³
M7.5	1：5.40	32.5	303	1.04
M10	1：4.4	32.5	398	1.08
M10	1：4.8	42.5	343	1.04

（5）施工要点

混凝土盖碗窖窖体包括水窖、窖盖两部分。水窖部分施工工序与水泥砂浆薄壁窖相同。混凝土帽盖施工分为土模制作、钢筋和铅丝制作绑扎、混凝土浇筑养护三道工序。

① 土模制作　首先在平整好的窖址地面上去其表土，整修直径为 5～6m 的圆形平面。在平面上画直径为 4.5m 的圆，在圆外挖一条宽 0.55m、深 1.5m 的环形

的土槽。圆内的土体修成半球台状，顶部做成直径 1.0m，高 6cm 的土盘。再在半球状土模下部外沿挖一条宽 25cm，深 20cm 的环状槽，即为圈梁土模。然后将半球状土模拍打密实，再墁一层水泥砂浆。

② 钢筋布置绑扎　圈梁为 4 根 ϕ6 钢筋，环形布设。用 8 号铅丝作箍筋，间距 20cm。窖口用 ϕ6 钢筋做成直径 105cm 的圆环，窖口与圈梁之间用 12 根 ϕ6 钢筋沿半球体表面均匀辐射分布，再用 8 号铅丝横向环绕，间距 20cm。钢筋与铅丝交叉处用 24 号铅丝绑扎。

③ 混凝土浇筑　钢筋绑扎好后，即可浇筑帽盖混凝土，厚度 6cm，混凝土水泥∶砂子∶石子配合比为 1∶2∶4。先从圈梁开始，然后沿四周由下往上浇筑。在距窖顶 50cm 处预埋 ϕ8～10cm 的进水管（孔）。混凝土浇筑时要一次成型，振捣密实，及时收面三次，用麦草覆盖混凝土，帽盖四周要分层填土夯实，以增强窖盖的稳定性。窖口要及时做好窖台、窖盖设施。

4.3.3.7 混凝土球形水窖

（1）适用条件

该种窖形对于取砂方便的黄土地区均可采用，不受土质条件的影响。

（2）结构形式与尺寸

球形水窖的结构见图 4-7，由储水间、窖颈、圈梁、进水道、窖盖、过滤池等 6 部分组成。储水间由上半球壳及下半球壳组成，上半球壳由 C15 混凝土现浇 8～10cm，下半球壳由 C20 混凝土现浇 4cm。

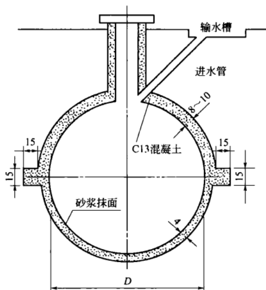


图 4-7　混凝土球形窖构造示意（单位：cm）

球形水窖的尺寸确定可参照表 4-22 或按公式（4-17）确定。

表 4-22　球形水窖主要尺寸、工程量、材料表

容积/m^3	主要尺寸/m				工程量/m^3					材料量			
	H_1	H_2	H_3	D	挖方	填方	混凝土	砂浆	砌砖	水泥/m^3	砂子/m^3	石子/m^3	砖/块
15	1.16	2.37	0.43	2.94	26.7	9.95	1.74	0.15	0.34	600	1.5	1.2	140
25	1.20	2.52	0.52	3.28	34.7	12.5	2.04	0.19	0.34	800	2.0	1.5	140
30	1.56	2.72	0.43	3.74	50.3	17.2	3.00	0.24	0.34	900	2.6	2.1	140

$$V=\frac{1}{6}\pi H_1\left(\frac{3D^2}{4}+H_1^2\right)+\frac{1}{6}\pi H_2\left(\frac{3D^2}{4}+H_2^2\right)$$

$$=\frac{1}{8}\pi D^2\ (H_1+H_2)\ +\frac{1}{6}\pi\ (H_1^3+H_2^3) \tag{4-17}$$

式中　V——球形窖的容积，m^3；

H_1——上半球高度，m；

H_2——下半球高度，m；

D——上下半球接合处直径，m。

(3) 防渗措施

窖内粉刷是确保不渗水的关键，上半球 8～10cm 混凝土及下半球 4cm 细石混凝土浇注完成后，先用 M10 砂浆粉刷 1cm，初凝前反复压实三遍收光，最后用水泥浆刷 3 遍。

(4) 配合比及材料用量

上半球壳包括圈梁用 C15 混凝土浇筑，下半球壳用 C20 细石混凝土浇筑，石子的粒径应小于 10mm。所用混凝土及砂浆的配比参见表 4-20 及表 4-21，不同容积的球形水窖的材料用量见表 4-22。

(5) 球形水窖工艺流程（图 4-8）

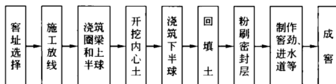


图 4-8　球形水窖工艺流程

(6) 混凝土球形水窖施工技术要点

混凝土现浇球形水窖整体性强，受力性能好，全窖只有两个半球壳和圈梁衔接在一起，施工技术要点如下。

① 放线　在选好的窖址上，根据开挖范围和高度，用皮尺、线绳、水平尺、木桩等进行放线钉桩，通过放线掌握工作面、圈梁、球形直径的界限，并通过圆心拉一条直线，将界限标在直线上，以备开挖时随时检查。

② 土模制作　当开挖工作面时，应根据预留尺寸边开挖边预留上半球窖壳的土模，上半部分开挖完成后，要进行全面细致的校核复查，使土模和受力圈梁槽的断面尺寸符合设计要求。

③ 浇筑圈梁和上半球　浇筑前为防止土体吸收混凝土中水分，先在土球模和圈梁预留槽中均匀铺衬一层牛皮纸，再进行圈梁浇筑，其成型断面为 15cm×15cm。12h 后，在圈梁上以螺旋式向上现浇上半球，每圈混凝土旋转高度不得超过 15cm，浇筑时掌握厚度（4cm），并用木抹子振捣压实混凝土。上半球浇筑完后，洒水养护 5～7 天。

④ 下半球窖体开挖与浇筑　开挖下半球窖体时，先将上半球中预留土模地方的土，全部取出至圈梁，然后从圈梁下边缘向里挖至浇筑厚度，以半径高度造型、夯实、拍光窖壁，再铺衬上牛皮纸后，从下到上均匀进行现浇，每次浇筑高度不应超过 20cm。受力圈梁和下半球窖壁接茬处，用 1∶3 砂浆进行捣缝密实处理，以加固结合部分。

⑤ 回填土　每层回填土厚度不应大于 25cm，回填时适当分层压实。回填土含水量应控制在 20%～25%之间，容重不小于 1.7g/cm³。当回填土与原地面水平时，必须收口密实，并高出原地面 3cm 左右，防止降雨期间出现集水沉陷。

⑥ 窖壁粉刷密封层　窖体内部粉刷是确保不漏水的关键。窖壁粉刷采用 M10 水泥砂浆，从下到上共抹面三次，每次抹面厚度不应超过 0.5cm，初凝前反复压实收光。

⑦ 窖颈、窖口、进水道和过滤池的砌筑　窖颈可用混凝土砌筑后内粉刷，也可加工内、外模一次现浇成功。窖口必须高出地面 0.2m，以防止杂物滚入。窖盖可用木板或混凝土一次现浇完成。过滤池的大小和进水道的孔径可根据来水流量而定，但进水道的进水口下沿略高于过滤池底，过滤池内装有一定级配的石子，作为过滤层。

⑧ 窖体养护　窖体养护时间不得少于 7 天。

4.3.3.8 水窑窖

(1) 适用条件

土质好、土层深厚的地方可以采用，水窑窖具有装水多、占地少、施工方便、取水容易等优点。

(2) 结构构造

水窑窖的结构分别见图 4-9～图 4-11，由工作窑及蓄水窑两部分组成。工作窑主要用于取土、进水、取水，其形状为一抛物线，蓄水窑则用于存水，上部为拱形，下部为梯形。

(3) 尺寸拟定

窑顶矢跨比（f/b_1）一般为 1/2～1/3，跨度 b_1 在 3m 以内；蓄水部分上宽下

窄，边坡为 1∶0.125～1∶0.1，深 3m 以内，底宽 b_2 在 1.5m～2.5m 间。

水窑窖的几何尺寸可参照表 4-22 或按公式（4-17）确定。

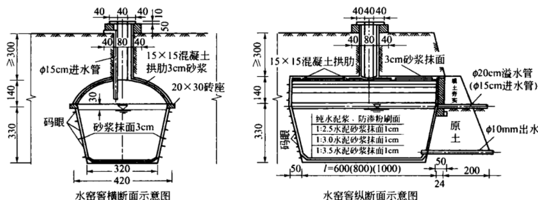


图 4-9　崖窑窖典型设计图（单位：cm）

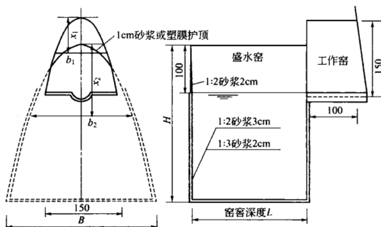


图 4-10　甘肃水泥砂浆抹面窑窖示意（单位：cm）

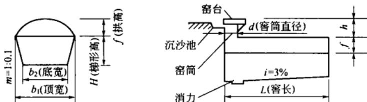


图 4-11　河南西部土水窑断面

4.3.3.9　涝池塘坝

(1) 适用条件

涝池塘坝应选在地基稳定，距集流面较近，来水方便的地区，以拦蓄沟岔水沙

资源。

（2）防渗措施

黄土地区的涝池塘坝可采用塑膜防渗，厚度0.15～0.2mm为宜。

（3）施工技术要点

涝池塘坝的边坡应控制在1∶1.5～1∶2之间，边坡基土应修成台阶。

底部土工膜上应夯填15～20cm土，边坡膜上可用草泥抹面10cm。

4.3.4 水窑辅助工程

（1）沉砂池

为了防止泥沙淤塞水管，在进水口处要修沉沙池，池的大小视来水量而定，一般1.5m见方即可，池深1m。

（2）进水管

多为硬塑料管，口径约10cm，与窖身连接，伸入窖内约15～20cm。进水管斜度以使水舌直接落入水窖为宜，以免冲刷窖壁。在进水口应设拦污栅，以防树枝、杂草等物进入水窖。

（3）窖台

用砖、石在窖口修建一个高出地面30cm的平台，设置木板、石板或水泥板将窖口盖好。

4.4 集水工程管理

4.4.1 水质管理

天然降水一般来说是比较纯净的，没有河水中常见的化学、有机物和重金属污染，但经过集流面后，水中带有许多泥土、杂物和微生物等，特别是在暴雨季节，在植被条件较差的天然土坡、土路面、土场院上产生的径流，水质更差，其中含有的大肠杆菌、细菌总数以及浑浊度等指标难以达到国家规定的水质标准（详见表4-23、表4-24），应采取措施尽量减少对雨水的污染，在饮用前必须先进行净化处理，一般可采取以下措施控制水质。

① 工程措施　集流输水渠（管）末端必须设沉沙池以沉淀泥沙，进水管口处设拦污栅过滤杂草污物，或者进入饮水管前，先经过一过滤池，池内用砂石料设置反滤层。

② 管理措施　采用瓦屋面、混凝土作为饮用水集流面时，在降雨来临前，应清扫庭院；对汇流沟、输水渠、沉沙池等应经常打扫；应防止畜禽进入集流面，保护集流区域干净卫生；庭院内不进行勾兑化肥、农药等工作。

表 4-23　生活饮用水常规指标（GB 5749－2006）

项　目		标　准
感官性状	色度（铂钴色度单位）	15
	浑浊度（散射浑浊单位）/NTU	1（水源与净水技术条件限制时为 3）
	臭和味	无异臭、异味
	肉眼可见物	无
一般化学指标/（mg/L）	pH（无单位）	6.5～8.5
	铝	0.2
	总硬度（以碳酸钙计）	450
	铁	0.3
	锰	0.1
	铜	1.0
	锌	1.0
	挥发酚类（以苯酚计）	2×10^{-3}
	阴离子合成洗涤剂	0.3
	硫酸盐	250
	氯化物	250
	溶解性总固体	1000
	耗氧量（COD_{Mn}法，以 O_2 计）	3（水源限制，原水耗氧量大于 6 时为 5）
毒理学指标/（mg/L）	氟化物	1.0
	氰化物	0.05
	砷	0.01
	硒	0.01
	汞	0.001
	镉	0.005
	铬（六价）	0.005
	铅	0.01
	四氯化碳	0.002
	硝酸盐（以氮计）	10（地下水源限制时为 20）
	三氯甲烷	0.06
	溴酸盐（使用臭氧时）	0.01
	甲醛（使用臭氧时）	0.9
	亚氯酸盐（使用二氧化氯消毒时）	0.7
	氯酸盐（使用复合二氧化氯消毒）	0.7
微生物指标	菌落总数（CFU/100mL）	100
	总大肠菌群	不得检出
	耐热大肠菌群	不得检出
	大肠埃希菌	不得检出
放射性指标/（Bq/L）	总 α 放射性	0.5
	总 β 放射性	1

注：1. MPN 表示最可能数；CFU 表示菌落形成单位。当水样检出总大肠菌群时，应进一步检验大肠埃希氏菌或耐热大肠菌群；水样未检出总大肠菌群时，不必检验大肠埃希氏菌或耐热大肠菌群。

2. 放射性指标超过指导值，应进行核素分析核评价，判定能否饮用。

表 4-24 农田灌溉用水水质标准（GB 5084—2005）

序号	项目	水作	旱作	蔬菜
1	五日生化需氧量/(mg/L)	≤60	≤100	≤40①,15②
2	化学需氧量/(mg/L)	≤150	≤200	≤100①,60②
3	悬浮物/(mg/L)	≤80	≤100	≤60①,15②
4	阴离子表面活性剂/(mg/L)	≤5.0	≤8.0	≤5.0
5	水温/℃	≤35		
6	pH	≤5.5～8.5		
7	全盐量/(mg/L)	≤1000③(非盐碱土地区),≤2000③(盐碱土地区)		
8	氯化物/(mg/L)	≤350		
9	硫化物/(mg/L)	≤1.0		
10	总汞/(mg/L)	≤0.001		
11	镉/(mg/L)	≤0.01		
12	总砷/(mg/L)	≤0.05	≤0.1	≤0.05
13	铬(六价)/(mg/L)	≤0.1		
14	铅/(mg/L)	≤0.2		
15	铜/(mg/L)	≤0.5		≤1.0
16	锌/(mg/L)	≤2.0		
17	硒/(mg/L)	≤0.02		
18	氟化物/(mg/L)	≤2.0(高氟区),≤3.0(一般地区)		
19	氰化物/(mg/L)	≤0.5		
20	石油类/(mg/L)	≤5.0	≤10	≤1.0
21	挥发酚/(mg/L)	≤1.0		
22	苯/(mg/L)	≤2.5		
23	三氯乙醛/(mg/L)	≤1.0	≤0.5	≤0.5
24	丙烯醛/(mg/L)	≤0.5		
25	硼/(mg/L)	≤1.0(对硼敏感作物,如马铃薯、韭菜、笋瓜、洋葱、柑橘等) ≤2.0(对硼耐受性较强的作物,如小麦、玉米、青椒、小白菜、葱等) ≤3.0(对硼耐受性强的作物,如:水稻、萝卜、油菜、甘蓝等)		
26	粪大肠菌群数/(个/100mL)	≤4000	≤4000	≤2000①,1000②
27	蛔虫卵数/(个/L)	≤2	≤2	≤2①,1②

① 加工、烹调及去皮蔬菜。

② 生食类蔬菜、瓜类和草木水果。

③ 具有一定的水利灌排设施，能保证一定的排水和地下水径流条件的地区，或有一定淡水资源能满足冲洗土体中盐分的地区，农田灌溉水质全盐量指标可以适当放宽。

③ 药物措施　加药净化主要使水中悬浮的细颗粒进一步沉淀和针对水中的微生物进行消毒。当水浑浊时可加入少许明矾，根据经验每 50kg 水加 10～15g 明矾，可使 70%的细泥沙颗粒沉淀；消毒药物主要采用漂白粉和"灭疫皇"（每吨水投漂白粉 50g，或投灭疫皇 10g）进行消毒；应坚持将水煮沸后饮用，这是最好的净化方法，煮沸后不仅可以杀死细菌，也可沉淀一部分固体悬浮物。

4.4.2 工程管护

为了保证集水工程安全运行，使集流面长期保持设计的集流效率，使蓄水工程正常蓄水、供水和灌溉设施正常运行，做好雨水集蓄利用工程的运行管理和维修则显得尤为重要，集雨工程的运行管理应注意以下事项。

① 经常检查混凝土等人工集流面，发现裂缝及时修补，修补裂缝可用水泥砂浆、沥青砂浆或聚乙烯胶泥等材料。

② 冬季降雨降雪要及时清扫，以减轻冻胀破坏作用。

③ 经常观测蓄水位的变化，检查蓄水工程是否漏水。蓄水位发生异常下降时，分析原因，以便采取维修加固措施。

④ 做好清淤工作。每年水窖（池）放空时，应清除窖（池）底的沉淀物和其他污物。

⑤ 保持窖内湿润。为了防止窖底干裂，窖（池）底要保持 20～30cm 的水层，不要放干。水窖建成后，不能及时蓄水时，可先倒入几担养窖水。

⑥ 适时蓄水。下雨前应及时清理截流输水渠杂物，疏通进水管道，以便不失时机地引水入窖。

⑦ 及时维修灌溉设施，发现管道漏水应及时换接。滴灌滴头或渗水孔如有堵塞应及时清除，过滤器应经常清洗，水泵及电机应经常保养维修，配电盘应加罩防护，防止触电事故发生。

⑧ 建立窖权归户所有的管护制度，贯彻谁建、谁管、谁修、谁拥有的原则。

参考文献

[1] 张祖新，垄时宏，王晓玲等．雨水集蓄工程技术 [M]．北京：中国水利水电出版社，1999.
[2] 马孝义．北方旱区节水灌溉技术 [M]．北京：海潮出版社，1999：27.
[3] 钱蕴壁，李英能，杨刚．节水农业新技术研究 [M]．郑州：黄河水利出版社，2002：406.
[4] DB64/T 198—1998 [S].
[5] DB62/T 495—1997 [S].
[6] 吴普特，黄占斌，高建恩等．人工汇集雨水利用技术研究 [M]．郑州：黄河水利出版社，2002：200.
[7] 冯广志，张红兵，朱强．农村集雨工程简明读本 [M]．北京：中国水利水电出版社，2001：31.
[8] 汪志农．灌溉排水工程学 [M]．北京：中国农业出版社，1998：130.
[9] 黄河水利委员会水利科学研究所．黄河流域旱井调查研究 [M]．北京：水力电力出版社，1958：36.
[10] 杨峡，刘亚非，张春贤．旱地水窖的设计与施工技术 [J]．干旱地区农业研究，1997，15（2）：

89-93.
[11] 娄宗科，党进谦，许永功等．黄土地区水窖窖设计参数与施工技术研究［J］．水土保持通报，2001，21（3）：14-17.
[12] 李宗利，王亚红，闫宁霞．旱地水窖结构形式与设计的初步研究［J］．农业工程学报，2001，17（3）：161-164.

第 5 章　旱地农业补充节水灌溉技术

5.1　旱地农业节水的主要特点和增产机理

5.1.1　旱作物对农田水分的基本要求

5.1.1.1　对土壤水含量的要求

旱作物生长对土壤含水量的要求有一定的界限范围，通常均以适宜土壤水分含量表示。适宜土壤含水量是指在作物的任一生长时段内都能保证正常生长发育所需要的土壤水分含量，一般以水分占土壤重量百分数或田间持水量的百分数表示。适宜土壤含水量随作物种类、品种及其生育阶段的需水特点、土壤质地与结构、施肥等农业综合技术措施和气象条件等不同而有差异。

对于任何一种旱作物的不同生育阶段，都有一个最适宜的土壤含水量范围。这不仅是为了满足作物各生育阶段的需水要求，而且更重要的是，还能为作物提供一个有利于生长发育的良好土壤水分环境。为达到作物高产优质的目标，应尽量通过合理的灌溉和配水技术，把有限的水资源合理调配，使区域作物生长环境的土壤水分含量处于合理的界限范围内。根据研究显示，旱作物适宜土壤含水量下限与上限的范围一般相当于田间持水量的 55%～85%。

5.1.1.2　对田面淹水层的要求

由于强降雨或超量灌溉，往往会使旱作物生长区域产生淹水层。若旱作物长时间被积水淹泡就会导致生长发育不良，进而造成减产，甚至绝收。

衡量旱作物忍受淹涝程度的指标，称为作物耐淹能力，或称作物耐涝能力。即在产量不受明显影响的前提下，作物能忍受淹水的深度及时间。作物耐淹能力与作物的种类、品种、生育阶段、土壤水分组成和植株素质等因素有关。一般情况下，高秆作物耐淹能力强于矮秆作物，植株健壮的作物耐淹能力强于瘦弱的作物。田面的淹水越深，淹水历时越长，温度越高，旱作物耐淹能力越低。另外，作物在浑水或含盐的水中更不耐淹。

作物生长发育阶段不同，它的耐淹能力也有显著不同。如小麦前期比后期耐淹，而玉米和豆类则后期比早期耐淹，高粱比其他旱作物都耐淹。几种旱作物不同生长阶段的耐淹能力见表 5-1。

表 5-1 几种旱作物不同生长阶段的耐淹能力

作物种类	生育期	容许淹水深度/cm	容许淹水历时/天
棉花	开花结铃期	5～10	1～2
玉米	抽穗期	8～12	1～1.5
	孕穗灌浆	8～12	1.2～2
	成熟期	10～15	2～3
春谷	孕穗期	10～15	1～2
	成熟期	10～15	2～3
高粱	孕穗期	10～15	6～7
	灌浆期	15～20	8～10
	乳熟期	15～20	15～20
大豆	开花期	7～10	2～3
小麦	拔节期	10	＜10

5.1.1.3 对农田地下水位的要求

旱作物对农田地下水位的要求主要包括防渍害和防盐碱危害两个方面。

（1）适宜于旱作物生长发育的地下水位与防渍害的要求

在作物生育期内，若土壤水分过多，超过了田间持水量，甚至达到饱和含水量，而地下水位上升几乎与地面齐平时，虽然地面上并没有产生积水，但因土壤中所有大小孔隙都被水分所充满，致使土壤内空气减少，从而造成根系缺氧和呼吸困难，生长不良，影响到根系对水分和养分的吸收，甚至烂根死亡。因此，为保证作物正常生长发育，平时地下水埋藏深度不小于适宜埋深，而在降雨或灌水后，就要求地下水位在允许的时间内回降到适宜的地下水埋深以下。作物所要求的适宜地下水埋藏深度因作物种类、品种及其生育阶段，以及土壤质地等条件不同而异。几种主要旱作物所要求的地下水埋深参见表 5-2。

表 5-2 几种旱作物要求的地下水埋深

地下水埋深参数	作物							
	小麦		玉米	棉花		高粱	甘薯	大豆
	生育初期	生育后期	孕穗～灌浆	开花	结铃期	开花期		开花期
生育期要求保持的地下水埋深/m	1.0～1.2		1.2～1.5	1.0～1.5		0.8～1.0	0.9～1.1	
雨后容许的地下水埋深/m	0.8	1.0	0.4～0.5	0.4～0.5	0.7	0.3～0.4	0.5～0.6	0.3～0.4
雨后降至容许埋深的响应时间/d	15	8	3～4	3～4	7	12～15	7～8	10～12

作物对地下水埋深的要求也与作物的耐渍能力有关。作物耐渍能力是指作物忍受过多土壤水分的能力。它也取决于作物的种类、品种与其生育阶段，以及土壤质地和结构等因素。如小麦和棉花，不同生育期所要求的地下水埋深（即耐渍能力）见表 5-3。

表 5-3　小麦、棉花的耐渍能力

作物	小麦				棉花	
生育阶段	播种～出苗	分蘖越冬	返青	拔节～成熟	苗期、蕾期	花铃～吐絮
地下水埋深/m	0.5	0.6～0.8	1.0～1.2	0.5～0.8	1.0～1.5	1.5

（2）防止土壤返盐的地下水埋深的要求

在地下水位较高而又有产生盐碱威胁地区的土壤中，种植旱作物时，为了防止土壤盐碱化，要求地下水埋深必须在地下水临界深度以下。地下水临界深度是指在一定的自然条件和农业技术措施条件下，为了保证土壤不产生盐碱化和作物不受盐害所要求保持的地下水最小埋藏深度。它的大小与土壤质地、地下水含盐量、气象条件、土壤温度以及灌溉排水条件和农业技术措施有关。轻质土，如砂壤土、轻壤土的毛细管输水能力强，较黏质土蒸发量大，易在土壤内积盐，故应有较大的地下水临界深度。精耕细作，松土施肥，可减少土壤蒸发，防止返盐，故其地下水临界深度较小，地下水临界深度一般应根据实地调查和观测试验资料确定。北方地区采用的地下水临界深度参考表 5-4。

表 5-4　北方一些地区采用的地下水临界深度

地区	土壤质地	地下水矿化度/(g/L)	临界深度/m	地区	土壤质地	地下水矿化度/(g/L)	临界深度/m
河北省北部和东部平原区	轻壤	<2	1.9～2.1	陕西省洛惠渠灌区	沙壤土	1～3	1.4～1.6
		2～5	2.1～2.3		轻壤土	2～7	1.5～1.8
	沙壤	5～10	2.3～2.5		中壤土	10～30	2.1～2.4
	中壤	<2	1.5～1.7		重壤土	7～15	1.8～2.1
		2～5	1.7～1.9		轻黏土	7～15	1.1～1.4
		5～10	1.9～2.1	山东省打鱼张灌区	全剖面以沙壤土	<3～5	2.0
	重壤、黏土和厚黏土层	<2	0.9～1.1		为主和上沙下黏	>3～5	2.2
		2～5	1.1～1.3		剖面中间有黏土层	<3～5	1.3
		5～10	1.3～1.5		和上黏下沙剖面	>3～5	1.5
	轻壤土	1～3	1.8～2.1	内蒙古自治区黄河灌区	轻砂壤	3～5	1.8
		3～5	2.1～2.3			5～7	2.0
		5～8	2.3～2.6			7～9	2.2
		8～10	2.6～2.8			10	2.3
河南省平原地区	轻壤土夹胶泥	1～3	1.5～1.8		黏质或间黏	3～5	1.1
		3～5	1.8～2.1			5～7	1.2
		5～8	2.1～2.2			7～9	1.3
		8～10	2.2～2.4			10	1.35
	胶泥			新疆建设兵团沙井子土壤改良综合试验站	有黏质间层	<10	1.5～1.7
					砂壤-轻壤	10 左右	>2.0
		1～5	1.0～1.2		有薄黏质夹层	10 左右	1.8～2.2
		5～10	1.2～1.4		有厚黏质夹层	10 左右	1.6～1.8
					有黏质夹层	>20	2.4～2.65

5.1.2 旱作物生长对地面灌溉节水技术的基本要求

旱作物地面灌水一般要求为：①保证实现定额灌水；②田间水的有效利用率高；③田间灌水均匀度高，灌水质量高；④高效低耗，灌水成本低；⑤方便与农业技术措施密切配合；⑥简易经济、便于推广。

5.2 地面节水灌溉技术

地面灌溉是最古老的，也是现今世界上采用最普遍的农田灌溉技术措施。据统计，全世界用地面灌水方法灌溉的面积占总灌溉面积的90%左右。我国现有灌溉面积的97%仍然采用这类方法。我国劳动人民数千年来积累了极为丰富的地面灌溉经验，对促进和发展我国农牧业生产起了很重要的作用。

我国是一个干旱、半干旱及半湿润易旱地区（简称旱区）面积较大的国家，旱区面积约占总国土面积的74%，其中东北、华北、西北三大行政区的旱区面积约占全国土地面积的47%，且都超过了各区土地面积的80%。这个地区地域辽阔，资源又十分丰富，因此已成为我国林业、牧业、煤炭、石油、天然气和化工产业的重要基地。同时，这三个地区的土地资源宽广，光照资源充足，农业生产发展潜力巨大。

但是，旱区天然降水量稀少，水资源一般都很欠缺，因此，经常发生干旱，旱灾频率达50%～80%，甚至十年九旱，连年干旱。干旱是旱区农业产量长期低而不稳的最根本原因。近年来，随着工农业生产规模的扩大和人口的不断增长，工农业用水量和人畜用水量急剧增加，水源不足更趋严重，缺水已成为我国旱区经济可持续发展的最大制约因素。

地面灌溉的主体是各种地面灌水方法，但从地面灌溉体系和节水技术看，地面灌溉还应包括相应的田间工程和田间灌溉管理两个组成部分。

地面灌水方法是使灌溉水通过田间渠沟或管道输入田间，水流在田面上呈连续薄水层或细小水流沿田面流动，主要借重力作用兼有毛细管作用下渗湿润土壤的灌水方法，又称重力灌水方法和全面灌水方法。

5.2.1 地面灌水方法简介

根据灌溉水向田间输送的形式和湿润土壤的方式不同，地面灌水方法可分为畦灌、沟灌和淹灌三类。

5.2.1.1 畦灌

畦灌是将田块用低矮土埂分割成许多矩形地块，灌溉水以薄水层水流进入田间，在重力和毛细管作用下湿润土壤的灌水方法。

畦灌有顺坡畦灌和横坡畦灌两种。地面坡度较小（小于1/100），畦田长边方向沿最陡地面坡度方向，即垂直于等高线布置的，称顺坡畦灌；地面坡度较大，畦

长方向与等高线斜交或平行布置的，称横坡畦灌。依畦田长度划分，畦灌又有长畦灌和短畦灌两种。通常，畦长大于 100m 的称为长畦灌；畦长小于 70m 的称为短畦灌或小畦灌。试验表明，短畦灌较长畦灌可省水 30%以上，在相同施肥和灌溉条件下，作物产量较高。一般长畦灌的田间灌水有效利用率小于 70%，短畦灌的田间灌水有效利用率可达 80%以上。土地平整程度较好的，田间灌水有效利用率可以更高。畦灌是目前世界上运用最广泛的灌水方法之一。

5.2.1.2　沟灌

沟灌是将灌溉水引入田间垄沟，水借助重力作用和毛细管作用向灌水沟沟底和沟两侧入渗，湿润灌水沟周围土壤的地面灌水方法。

沟灌依地形坡度也有顺坡沟灌和横坡沟灌两种方法。依灌水垄沟断面尺寸大小又可分为深沟灌和浅沟灌两种。深沟灌常用于灌溉多年生、深根行播作物，浅沟灌或细流沟灌一般适用于土壤渗水较缓慢的土质及密植作物。由于沟灌主要是借毛细管力湿润土壤，土壤入渗时间较长，故对于地面坡度较大或透水性较弱的地块，为了增加土壤入渗时间，常有意识增加灌水垄沟长度，使垄沟内水流延长，形成多种多样的灌溉垄沟形式，如回曲沟、锁链沟、直形沟、八字形沟、方形沟等。由于沟灌法沟内水流仅覆盖了 1/5～1/2 的地表面，因此与畦灌法相比，可降低地面土壤蒸发，土壤团粒结构的破坏较小，灌水量较省，灌水效果比较理想，田间灌水有效利用率可达 80%以上。

5.2.1.3　淹灌

淹灌是在田间用较高的土埂筑成方格格田，一般引入较大流量迅速在格田内建立起一定厚度的水层，水主要借重力作用下渗入土壤内的地面灌水方法。

淹灌方法主要适用于水稻、水生植物及盐碱地冲洗灌溉，在内蒙等地冬储灌水也常采用此类方法。

旱作物严禁使用淹灌方法，以避免产生深层渗漏，损失浪费大量灌溉水。

5.2.2　评估地面灌溉节水技术的主要指标

5.2.2.1　评估地面灌溉节水技术的主要经济指标

① 节水增产率

节水增产率是指在同样气候等自然条件和农业技术条件下，旱作物采用地面灌水方法某种节水灌水技术与传统地面灌水方法灌水技术间，其平均单位面积产量所增加的产量百分数，即

$$F_y=\frac{Y_1-Y_2}{Y_1}\times 100\% \tag{5-1}$$

式中　F_y——节水增产率，%；

Y_1、Y_2——两种灌水方法或两项灌水技术的平均单位面积产量，kg/hm^2。

节水增产率是评估地面灌水方法或灌水技术的一项综合性经济指标，它标志着

某种地面灌水方法或某项灌水技术的增产效果及其产量水平。

② 田间灌溉效率　田间灌溉效率，是指某次由最末一级固定渠道或管道（一般指毛渠、毛管）引入田间灌水，平均 1 个流量（即 $1.0m^3/s$）1 昼夜（自流灌区为 24h，提水灌区一般以 14～22h 计）实际灌溉的面积，即

$$F_f = 86400\frac{A}{W} \tag{5-2}$$

式中　F_f——田间灌溉效率，$hm^2/(m^3 \cdot s \cdot d)$；

A——1 昼夜实灌面积，hm^2/d；

W——最末一级固定渠道或管道实际引入田间的流量，m^3/s；

86400——1 昼夜按 24h 计算的秒数，s，若 1 昼夜按 14h 计算，则 86400s 应改为 50400s。

田间灌溉效率综合反映田间灌水管理工作的质量，是田间灌水管理的一项重要指标。

③ 灌水劳动生产率　田间灌水劳动生产率是指实施地面灌溉，每个灌水员 1 班（通常 1 班为 8h 或 12h）可能灌溉的面积，或者每个灌水员灌溉 $1hm^2$ 农田所需要的工日数。即

$$F_w = \frac{A}{nN} \tag{5-3}$$

$$D_w = \frac{nN}{A} \tag{5-4}$$

式中　F_w、D_w——灌水劳动生产率，单位分别为 hm^2/（人・班）和工日/hm^2；

A——1 昼夜实际灌溉的面积，hm^2；

n——灌水员每班人数，人；

N——1 昼夜的灌水分班数，班。

田间灌水劳动生产率的高低与田间工程的合理布局和完善程度、灌水劳动组织、灌水工具及设备、田面平整状况及灌水员的技术熟练程度等有密切关系。

④ 田间灌水成本　田间灌水成本是指旱作物采用地面节水技术灌溉农田单位面积所需要的费用，即

$$C = \frac{C_P + C_W + C_j + C_i}{A} \tag{5-5}$$

式中　C——田间灌水成本，元/hm^2；

C_P——灌水员的工资，元；

C_W——水费或水资源费，元；

C_j——灌水工具，灌水设备、机具、机电装置，以及田间工程设施和土地平整等的折旧费用，元；

C_i——燃料，包括机电用油或用电及照明等的费用，元；

A——实际灌溉面积，hm^2。

⑤ 节水率　节水率是标志灌水方法节水效益高低的重要指标。节水率指不同地面灌水方法单位面积灌溉用水量的比值，即

$$\eta_a=\frac{W_1-W_2}{W}\times 100\% \tag{5-6}$$

式中　η_a——节水率，%；

W_1，W_2——分别为两种灌水方法单位面积上的灌溉用水量，通常可用实际的灌水定额计算，m^3/hm^2。

5.2.2.2 评估地面灌水方法的质量指标

正确设计和实施地面灌水方法，必须制定一套完整的质量指标体系。多年来，国内外许多农田灌溉专家、学者曾提出了多个分析评估农田灌水方法的田间灌水质量指标。其中，目前最常用的有以下三个。

① 田间灌溉水有效利用率　田间灌溉水有效利用率是指，应用某种地面灌水方法或某项灌水技术后，储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量与实际灌入田间的总水量的比值，即

$$E_a=\frac{V_S}{V}=(\frac{V_1+V_4}{V})=\frac{V_1+V_4}{V_1+V_2+V_3+V_4} \tag{5-7}$$

式中　E_a——田间灌溉水有效利用率，%；

V_S——灌溉后储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量，m^3 或 mm；

V_1——作物有效利用的水量，即作物蒸腾量，m^3 或 mm；

V_2——深层渗漏损失水量，m^3 或 mm；

V_3——田间灌水径流流失水量，m^3 或 mm；

V_4——主要指作物植株之间的土壤蒸发量（对于地面灌水方法），m^3 或 mm；

V——输入田间实施灌水的总水量，m^3 或 mm。

土壤灌水后剖面湿润情况如图 5-1 所示。

田间灌溉水有效利用率表征应用某种地面灌水方法或某项灌水技术后农田灌溉水充分利用的程度，是标志农田灌水质量优劣的一个重要评估指标。对于旱作物地面灌溉，SL 205—98《节水灌溉技术规范》要求田间灌溉水有效利用率 $E_a\geqslant 90\%$。

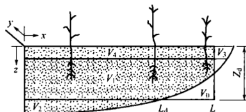


图 5-1　土壤入渗剖面湿润情况

Z_d—计划湿润深；L_d—畦沟长度；V_0—欠缺水量

② 田间灌溉水储存率　田间灌溉水储存率是指应用某种地面灌水方法或某项灌水技术灌溉后，储存于计划湿润作物根系土壤区内的水量与灌溉前计划湿润作物根系土壤区所需要的总水量的

比值，即

$$E_S=\frac{V_S}{V_n}=\frac{V_1+V_4}{V_1+V_4+V_0} \tag{5-8}$$

式中 E_S——田间灌溉水储存率，%；

V_n——灌水前计划湿润作物根系土壤区内所需要的总水量，m^3 或 mm；

V_0——灌水量不足区域所欠缺的水量，m^3 或 mm；

其余符号意义同前。

田间灌溉水储存率表征某种地面灌水方法、某项灌水技术实施灌水后，能满足计划湿润作物根系土壤区所需要水量的程度。

③ 田间灌水均匀度 田间灌水均匀度是指，应用地面灌水方法实施灌水后，田间灌溉水湿润作物根系土壤区的均匀程度，或者田间灌溉水下渗湿润作物计划湿润土层深度的均匀程度，或者表征为田间灌溉水在田面上各点分布的均匀程度，通常用下述公式表示：

$$E_d=1-\frac{\Delta Z}{Z_d} \tag{5-9}$$

或

$$V_d=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}|X_i-M|}{NM} \tag{5-10}$$

式中 E_d、V_d——田间灌水均匀度，%；

ΔZ——灌水后各测点的实际入渗水量与平均入渗水量离差绝对值的平均值，m^3 或 mm；

Z_d——灌水后土壤内的平均入渗水量，m^3 或 mm；

M——N 个测点的平均入渗水量，m^3 或 mm；

X_i——等面积测点的点入渗水量，m^3 或 mm；

N——测点数。

田间灌水均匀度表征应用地面灌水方法、灌水技术实施灌水后，田面各点受水的均匀程度，以及湿润土壤计划层深度内的入渗水量的均匀程度。一般对地面灌水方法应要求，$E_d \geq 85\%$以上，最高 $E_d=100\%=1.0$。

上述三项评估灌水质量指标共同反映了作物产量和水资源利用程度的影响，它们必须同时使用才能较全面地分析和评估某种灌水方法或某田间灌水过程的灌水效果。目前，农田灌水方法都选用田间灌溉水有效利用率 E_a 和田间灌水均匀度 E_d 两个指标作为设计标准。而实施田间灌水则必须采用 E_a、E_S 和 E_d 三个指标共同评估其灌水质量的好坏，单独使用其中任一项指标都不能较全面和正确地判断田间灌水质量的优劣。

5.2.3 畦灌技术及其改进

畦灌是地面灌溉中推广应用最广泛的灌水方法之一。近年来，随着节水灌溉技

术的发展，我国农田灌溉除继续应用传统的畦灌方法，改进和完善其灌水技术外，还不断吸取了许多国外推行的较为先进的畦灌技术，同时我国灌区群众也创造了不少新的、更行之有效的节水畦灌技术。

5.2.3.1　畦灌灌水技术

（1）畦灌的特点

畦灌是用临时修筑的土埂将灌溉土地分隔成一系列的长方形田块，即灌水畦，又称畦田。灌水时，灌溉水从输水垄沟或直接从田间毛渠引入畦田后，在畦田田面上形成很薄的水层，沿畦长坡度方向均匀流动，在流动的过程中主要借重力作用，以垂直下渗的方式逐渐湿润土壤的灌水方法。畦灌方法主要适用于灌溉窄行距密植作物或撒播作物。

（2）畦田布置及规格

① 畦田布置　畦田布置应主要依据地形条件，并结合考虑耕作方向，一般认为以南北方向布置为最好，但应保证畦田沿长边方向有一定的坡度。

一般适宜的畦田田面坡度为 0.001～0.003，最大可达 0.02，但畦田田面坡度过大容易冲刷土壤，而引发水土流失。根据地形坡度，畦田布置有两种形式，在南北方向地面坡度较平缓的情况下，通常沿地面坡度布置，也就是畦田的长边方向与地面等高线垂直，见图 5-2（b）。若土地平整较差，南北方向地面坡度较大时，为减缓畦田内地面坡度，畦田也可与地面等高线斜交或基本上与地面等高线方向平行，见图 5-2（c）。根据输水垄沟或毛渠向畦田的供水方式，畦田可分为单向灌水和双向灌水两种形式。单向灌水法是输水垄沟或毛渠只向一侧畦田供水，它适用于地面坡度较大的情况。双向灌水法是输水垄沟或毛渠可向两侧畦田供水，它适用于地面坡度较小，平整较好的情况。在山区、丘陵地区，地形比较复杂，应结合当地地形等具体情况，因地制宜地确定畦田布置形式，通常可采用梯田小畦或在畦田内加筑各种形式的土档地埂，以分散水流，减缓畦田内水流流速，防止冲刷畦田田面，促使土壤湿润均匀，提高灌水均匀度。

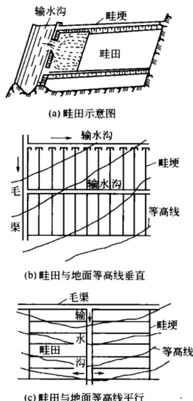


图 5-2　畦灌布置示意图

② 畦田规格　畦田规格主要指畦田的长度、畦田的宽度和畦埂断面。畦田规格的大小对灌水质量的好坏，灌水效率的高低，土地平整工作量的多少，以及对田间渠网的布置形式和密度与畦埂占地面积等影响很大。畦田规格主要与地形和耕作

水平等因素有关，实施畦灌，必须合理地确定畦长、畦宽和畦埂断面，才能实现设计的节水目标。

a. 畦宽。畦宽主要取决于畦田的土壤性质和农业技术要求，以及农业机具的宽度。通常，畦宽多按当地农业机具宽度的整倍数确定，一般约2～4m，传统畦灌法的畦宽一般都要求最宽不宜大于3m。在水源流量小时或井灌区，为了迅速在整个畦田面上形成流动的薄水层，一般畦田的宽度较小，多为0.8～1.2m左右。为了灌水均匀，一般要求畦田田面无横向坡度，以免水流集中，冲刷畦田田面土壤。

b. 畦长。畦长应根据畦田纵坡、土壤质地及土壤透水性能、土地平整情况和农业技术条件等合理确定。畦田田面坡度大的畦长宜短，纵坡小的畦长可稍长；砂质土壤，土壤透水性能强，畦田长度宜短，黏质土壤，土壤透水性能弱，畦长可以稍长。总之，畦田的长短，应要求畦田田面灌水均匀，并尽量使湿润土壤均匀，筑畦省工，畦埂少占地，便于农业机具工作和田间管理。若畦田过长，往往会使畦首、畦尾灌水很难一致，土壤湿润更不易均匀。目前我国自流灌区，一般传统畦灌法的畦长以50～75m为宜，以保证灌水均匀，能实现定额灌水。在提水灌区和井灌区，畦长应短一些。一般畦长约30～50m。畦长与土壤质地及地面坡度的关系见表5-5，供参考。

表5-5 不同土壤质地及地面坡度的畦长 单位：m

土质	坡度			
	<0.002	0.002～0.005	0.005～0.01	0.01～0.02
轻砂壤土	20～30	50～60	60～70	70～80
砂壤土	30～40	60～70	70～80	80～90
黏壤土	40～50	70～80	80～90	90～100
黏土	50～60	70～80	80～90	100～110

但是，若地面坡度较大，而土壤透水性又较弱时，可以适当加大畦长，但入畦的单宽流量则需适当减小。若地面坡度较小，土壤透水性较强时，则要适当缩短畦长，但应适当加大入畦流量，才能使灌水均匀，并防止产生深层渗漏。

c. 畦埂。畦埂断面一般为三角形，畦埂高约0.2～0.25m，底宽0.3～0.4m，引浑水灌溉的地区应适当加大些。畦埂是临时性的，应与整地、播种相结合，最好采用筑埂器修筑。对于密植作物，畦埂也可以进行播种。为防止畦埂跑水，在畦田地边和路边最好修筑固定的地边畦埂和路边畦埂，其埂高不应小于0.3m，底宽0.5～0.6m，顶宽0.2～0.3m。

③ 畦灌灌水技术　实施畦灌，要特别注意提高畦灌灌水技术，理想的畦灌灌水技术应当是，在一定的灌水定额情况下，薄层水流由畦首流到畦尾的同时，从畦田地表面向下的垂直入渗也将该定额水量全部渗完，并在整个畦田面的纵横两个方向下渗水量分布均匀，湿润土壤均匀，而且不易造成部分畦田田面积水与部分畦田

土层湿润不足或者发生深层渗漏与泄水流失。畦灌必须选定或确定合理的灌水技术要素，以达到节约灌溉水的目的。一般灌水技术要素之间的关系都应在总结灌水生产实践经验或分析畦灌田间试验研究资料的基础上，予以正确确定。

畦灌灌水技术要素主要指畦田长度、畦宽、每米畦宽引用的入畦流量，即单宽流量和放水入畦时间等。渗入到畦田内土壤中的水量达到计划灌水定额时，畦田内各处所需要的入渗时间依下述经验公式确定：

$$H_t = K_0 t^{1-\alpha} \tag{5-11}$$

$$H_{t_n} = m \tag{5-12}$$

式中　H_{t_n}——t_n 时间渗入到土壤中的水量，cm；

m——计划的灌水定额，cm；

K_0——第一个单位时间内的平均入渗速度，cm/h；

t_n——畦田内各处入渗水量达到计划灌水定额所需要的下渗时间，h；

α——土壤入渗递减指数。

K_0 和 α 需通过土壤入渗试验得到，若无实测资料也可采用下述数值：对于弱透水性土壤，采用 $K_0 \leqslant 5$cm/h；强透水性土壤，$K_0 \geqslant 15$cm/h；中等透水性土壤，$K_0 = 5 \sim 15$cm/h。K_0 还随作物生育阶段和灌水次数变化。例如：河南引黄灌区，实测小麦播前灌水时，$K_0 = 6 \sim 8$cm/h；冬灌至返青灌水，$K_0 = 4 \sim 6$cm/h；灌浆灌水时，$K_0 = 3 \sim 4$cm/h。α 一般可采用 0.3～0.8，轻质土壤采用小值，重质土壤采用大值。

土壤入渗速度的高低取决于土壤的孔隙、质地、结构，以及初始土壤含水量、表土状况和水温等因素。其中，土壤质地影响最大。砂土不仅初始入渗速度高，达到稳定入渗速度所需时间短，而且稳定入渗速度值也高。黏土则相反，初始入渗速度较低，达到稳定入渗速度所需要的时间长，其稳定入渗速度值也小。表 5-6 为几种不同质地土壤的稳定入渗速度数值范围。

表 5-6　几种不同质地土壤的温度入渗速度

土壤	砂	砂质土壤和粉砂质土壤	壤土	黏质土壤	碱化黏质土壤
稳定入渗速度/(mm/h)	>20	10～20	5～10	1～5	<1

因此
$$t_n = (m/K_0)^{1-\alpha} \tag{5-13}$$

应当明确指出，畦首供水时间通常都近似采用下渗时间 t_n。

进入畦田的总灌水量应与灌水定额所需要的水量相等，即令

$$3600Qt = mbL$$

$$q = \frac{Q}{b} \tag{5-14}$$

$$3600qt = mL$$

式中　Q——畦首控制的入畦流量，m^3/s；

q——入畦单宽流量，$m^3/(s \cdot m)$；

b——畦宽，m；

L——畦长，m；

m——灌水定额，m^3/hm^2；

t——畦首处畦口的供水时间，h，可近似采用下渗时间 t_n。

由式（5-14）即可计算已知畦田规格情况下的入畦单宽流量 q，或选定入畦单宽流量 q 后，设计畦长及畦宽。由式（5-14）可知，在相同的土质、地面坡度和畦长情况下，入畦单宽流量的大小主要与灌水定额有关。一般是，入畦单宽流量愈小，灌水定额愈大，入畦单宽流量愈大，灌水定额愈小。

通常，在农田灌溉生产实践中，灌水定额、土壤性质以及地面坡度均已确定，此时畦灌技术和畦灌设计主要是确定畦田长度和入畦单宽流量，但还应防止入畦水流对畦田田面土壤的冲刷，从而产生水、土、肥的严重流失。因此，一般要求畦田上的薄层水流推进流速不得超过 0.1～0.2m/s。根据陕西省关中灌区各地灌溉试验结果，当灌水定额为 $600\sim750m^3/hm^2$，畦田地面坡度为 1/400～1/1000 时，在中壤土和轻壤土质上，畦长为 30～100m 条件下，入畦单宽流量以采用 $3\sim6L/(s \cdot m)$ 为宜，见表 5-7。表 5-8 列举了河南省引黄灌区畦田灌水技术要素之间的关系，供各地选用参考。

表 5-7 陕西关中、陕北一般大田作物畦田灌水技术要素表

灌区	土壤	地面坡度	单宽流量/[L/(s·m)]	畦长/m
泾惠、洛惠、宝鸡峡灌区	壤土及砂壤土	1/1000～1/2000	2～5	50～100
陕北灌区	砂土及砂壤土	3/1000～7/1000	2.5～5	15～25
小型抽水及机井灌区	砂壤土	5/1000	2～3	7～15

表 5-8 河南省引黄灌区畦田灌水技术要素表

土质	坡度								
	<0.002			0.002～0.01			0.01～0.025		
	畦长/m	单宽流量/[L/(s·m)]	畦宽/m	畦长/m	单宽流量/[L/(s·m)]	畦宽/m	畦长/m	单宽流量/[L/(s·m)]	畦宽/m
弱透水性轻质土壤	30～50	5～6	3.0	50～70	5～6	3.0	70～80	3～4	3.0
中等透水性土壤	50～70	5～6	3.0	70～80	4～5	3.0	80～100	3～4	3.0
弱透水性土壤	70～80	4～5	3.0	80～100	3～5	3.0	100～130	2～3	3.0

（3）控制畦口放水时间和入畦总流量　为保证灌水均匀，就应使畦田上的薄层水流在畦田各点处的滞留时间相等，需要正确控制畦口的放水时间和入畦总流量。

在实施畦灌时，通常采用在畦首控制供水时间，及时封口改水的方法。采用以畦田薄水层水流长度与畦长的比值作为畦首供水时间的依据。改水成数应根据灌水

定额、土壤性质、地面坡度、畦长和单宽流量等条件确定，一般可采用七成、八成、九成或满畦封口改水措施。当土壤透水性较小，畦田田面坡度较大，可采用薄水层水流达畦长的七成或八成时畦口停止供水，封口改灌其他畦田。若畦田田面坡度小，土壤透水性强，应采用九成封口改畦措施。封口过早，会使畦尾灌水不足，甚至无水；封口过晚，畦尾又会产生跑水、积水现象，浪费了灌溉水量。总之，正确控制封口改水，可以防止畦尾漏灌，或发生跑水流失。据各地灌水经验，在一般土壤条件下，畦长 50m 时宜采用八成改水，畦长 30～40m 时宜采用九成改水，畦长小于 30m 应采用十成改水。

(4) 畦灌灌水技术计算实例　某灌区，小麦拔节期需要灌溉，已确定本次灌水的灌水定额为 $600m^3/hm^2$（即 60mm 水深）。采用畦灌法，其畦田规格为：畦长 50m，畦宽 3m。经土壤入渗试验实际测定，该畦田第一个小时内的平均入渗速度 $K_0=10cm/h$，入渗速度递减指数 $\alpha=0.5$。现需要确定本次灌水应采用多大的入畦单宽流量及畦首放水时间为多少等问题。

根据公式（5-13），可求出畦田各处入渗水量达到灌水定额时所需要的入渗时间。

因畦长不太长，该畦田土质为壤土，土壤透水性中等，可以不考虑畦首滞渗时间，也即畦首供水时间 t 就是入渗时间 t_n，于是可根据公式（5-14）得到入畦单宽流量：

$$t_n=\left(\frac{m}{K_0}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}=\left(\frac{6}{10}\right)^{\frac{1}{1-0.5}}h=0.36h$$

$$q=\frac{mL}{3600t}=\frac{0.06\times50}{3600\times0.36}m^3/(s\cdot m)=0.023m^3/(s\cdot m)=2.3[L/(s\cdot m)]$$

本次灌水需要畦首总供水流量为

$$Q=qb=2.3\times3=6.9(L/s)$$

计算时应特别注意单位，以免得出错误的计算结果。

5.2.3.2　水平畦灌

水平畦灌是田块纵向和横向两个方向的田面坡度均为零时的畦田灌水方法。水平畦灌实施灌水时，通常要求引入畦田的流量很大，以使进入畦田的薄水层水流能在很短时间内迅速覆盖整个畦田田面。

我国北方平原、丘陵及塬坡台地与河谷滩地等灌溉土地早已有类似于水平畦灌的悠久历史。例如，我国北方地势平坦的渠灌区，像内蒙古河套灌区，宁夏青铜峡灌区，甘肃河西走廊灌区，新疆和黑龙江农垦灌区，以及华北等地区畦块田宽度较大而长度又较短的广大井灌区，往往田面纵、横两个方向的地面坡度很小，当地农民群众至今仍在采用类似于水平畦灌法的无坡块灌法。不过，目前这些灌区大多采用大水漫灌方式，灌水技术落后，灌水质量差，效益低。因此，开展块灌法和水平畦灌法的试验研究，并加以示范推广应用，将对发展节水灌溉农业具有重要意义。

水平畦灌是在短时间内供水给大面积地块灌水的一种新的地面灌水方法，也是一种节约灌溉用水的先进灌水技术。水平畦灌的主要特点如下。

水平畦灌法适用于所有种类作物和各种土壤条件。畦田田面各方向的坡度都很小（≤1/3000）或为零，整个畦田田面可看作是水平田面。所以，水平畦田上的薄层水流在田面上的推进过程，将不受畦田田面坡度的影响而只借助于薄层水流沿畦田流程上水深变化所产生的水流压力向前推进。

由于水平畦田首末两端地面高差很小或为零，进入水平畦田的总流量很大，所以对水平畦田田面的平整程度要求很高，从而一般情况下，水平畦田不会产生田面泄水流失或出现畦田首端入渗水量不足及畦田末端发生深层渗漏现象，灌水均匀度高。在土壤入渗速度较低的条件下，灌溉田间水利用率可达98%以上。

根据水平畦田地块原有平整程度的好坏，可以采用粗平机械和精平机械。若原畦田田面起伏较大，就需要粗平机具先将地块田面大致整平，然后再进行精平。对于以前曾平整过的水平畦田，下次结合耕作一般只需精平即可。

对于水平畦田的土地平整程度，美国土地保持局要求的标准是，80%的水平畦田地块田面平均高差应在±1.5cm以内。实际上，利用激光控制的平地铲运机平整土地，其平整后的地面高差平均误差均在±1.5cm以内，最大误差为±3.0cm左右的畦田面积比例达到86%。

此外，由于水平畦灌供水流量大，故在水平畦田进水口处还需要有较完善的防冲措施。同时，又由于水平畦田宽度较大，为保证沿水平畦田全宽度都能按确定的单宽流量均匀灌水，必须采取与之相适应的田间配水方式、田间配水装置及田间配水技术措施。

水平畦灌法的灌水技术要素，同样也是畦长、畦宽、单宽流量和灌水时间等因素。由于水平畦灌法灌水技术要素的确定不能应用一般畦灌法理论和方法，而必须应用简化了的流体力学数学模型，也就是零位惯性量数学模型解算。这种计算方法很复杂，需借助于电子计算机求解。

5.2.3.3 节水型畦灌技术

近十多年来，在我国广大灌区为彻底杜绝大水漫灌、大畦和大块漫灌，以节约灌溉水，提高灌水质量，降低灌水成本，推广应用了许多项先进的节水型畦灌技术，取得了明显的节水和增产效果。

（1）小畦灌灌水技术

小畦灌灌水技术主要是指畦田“三改”灌水技术，也就是“长畦改短畦，宽畦改窄畦，大畦改小畦”的“三改”畦灌灌水技术。小畦灌“三改”灌水技术的畦田宽度，自流灌区为2～3m，机井提水灌区以1～2m为宜。地面坡度1/400～1/1000时，单宽流量为2.0～4.5L/s，灌水定额为300～675m^3/hm^2；畦长，自流灌区以30～50m为宜，最长不超过70m；机井和高扬程提水灌区以30m左右为宜。畦埂高度一般为0.2～0.3m，底宽0.4m左右，地头埂和路边埂可适当加宽培厚。

（2）长畦分段短灌灌水技术

小畦灌灌水技术需要增加田间输水渠沟和分水、控水装置，畦埂也较多，在实践中推广应用存在有一定的困难。因此，近年来在我国北方干旱缺水地区出现了一种将一条畦分成若干个没有横向畦埂的短畦，采用地面纵向输水沟或塑料薄壁软管，将灌溉水输送入畦田，然后自下而上或自上而下依次逐段向短畦内灌水，直至全部短畦灌完为止的灌水技术，称为长畦分段短灌灌水技术，如图 5-3 所示。

长畦分段短灌，若用输水沟输水和灌水，同一条输水沟第一次灌水时，应由长畦尾端短畦开始自下而上分段向各个短畦内灌水。第二次灌水时，应由长畦首端开始自上而下向各分段短畦内灌水，输水沟内一般仍可种植作物。长畦分段短灌，若用低压薄壁塑料软管（俗称小白龙）输水、灌水，每次灌水时均可将软管直接铺设在长畦田面上，软管尾端出口放置在长畦的最末一个短畦的上端放水口处开始灌水，该短畦灌水结束后可采用软管“脱袖法”脱掉一节软管，自下而上逐个分段向短畦内灌水，直至全部短畦灌水结束为止。长畦分段短灌技术的畦宽可以宽至 5～10m，畦长可达 200m 以上，一般均在 100～400m 左右，但其单宽流量并不增大。这种灌水技术的要求是，正确确定入畦灌水流量，侧向分段开口的间距（即短畦长度与间距）和分段改水时间或改水成数。因此，长畦分段短灌灌水技术主要是正确确定侧向分段开口间距。根据水量平衡原理和畦灌水流运动基本规律，在满足定额灌水和十成改水的条件下，计算分段进水口间距的基本计算公式如下：

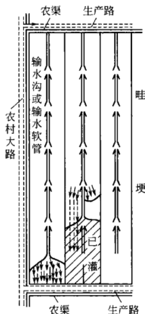


图 5-3 长畦分段短灌

对于有坡畦(块)灌 $$L=\frac{40q}{1+\beta_0}\left(\frac{1.5m}{k_0}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{5-15}$$

对于水平畦(无坡块)灌 $$L_0=\frac{40q}{m}\left(\frac{1.5m}{K_0}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{5-16}$$

式中 L_0——分段进水口间距，m；

β_0——地面水流消退历时与水流推进历时的比值，一般 $\beta_0=0.8\sim1.2$；

q——入畦（块）单宽流量，L/(s・m)；

m——灌水定额，m^3/hm^2；

K_0——第一个单位时间内的平均入渗速度，mm/min；

α——入渗递减指数。

正确应用长畦分段短灌法，就能达到省水、省地、省工、灌水均匀度高、灌水有效利用率高的目的。经实际应用证明，长畦分段短灌法是一种良好的节水型灌水

方法。表 5-9 为长畦分段短灌灌水技术要素表，仅供参考。

由于长畦分段短灌具有上述优点，因此已在山东、河北、辽宁和陕西等地普遍推广应用，取得了显著的经济效益。

表 5-9　长畦分段短灌灌水技术要素参考表

编号	输水沟或灌水软管流量 /(L/s)	灌水定额		畦长 /m	畦宽 /m	单宽流量 /[L/(s·m)]	单畦灌水时间		长畦面积 /亩	分段长度×段数 /(m×段)
		/(m^3/hm^2)	/mm				/min	/m^2		
1	15	600	6	200	3	5.00	40.0	600	0.9	50×4
				200	4	3.76	53.3	800	1.2	40×5
				200	5	3.00	66.7	1000	1.5	35×6
2	17	600	6	200	3	5.67	35.0	600	0.9	65×3
				200	4	4.25	47.0	800	1.2	50×4
				200	5	3.40	58.5	1000	1.5	40×5
3	20	600	6	200	3	3.67	30	600	0.9	65×3
				200	4	5.00	40	800	1.2	50×4
				200	5	4.00	50	1000	1.5	40×5
4	23	600	6	200	3	7.67	26.1	600	0.9	70×3
				200	4	5.76	34.8	800	1.2	65×3
				200	5	4.60	43.5	1000	1.5	50×4

(3) 宽浅式畦沟结合灌水技术

宽浅式畦沟结合灌水技术是群众创造的一种适应间作套种或立体栽培作物，“二密一稀”种植的灌水畦与灌水沟相结合的灌水技术。通过近年来的试验和推广应用，已证明这是一种高产、省水的优良灌水技术。这种灌水技术的特点是：①畦田和灌水沟相间交替更换，它的畦田面宽为 40cm，可以种植两行小麦（就是“二密”），行距 10～20cm；②小麦播种于畦田后，可以采用常规畦灌或长畦分段灌水技术灌溉，见图 5-4 (a)；③小麦乳熟期，在每隔两行小麦之间开挖浅沟，套种一行玉米（就是“一稀”），套种的玉米行距为 90cm，在遇干旱或土壤水分不足，或遇有干热风时，可利用浅沟灌水，灌水后借浅沟湿润土壤，为玉米播种和发芽出苗提供良好的土壤水分条件，见图 5-4 (b)；④小麦收获后，玉米已近拔节期，可在小麦收割后的空白畦田田面处开挖水沟，并结合玉米中耕培土，把从畦田田面上挖出的土壤覆在玉米根部，就形成了垄梁及灌

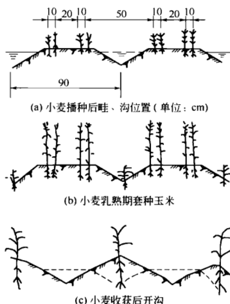


图 5-4　宽浅式畦沟结合条田轮作示意图

水沟埂，而原来的畦田田面则成为灌水沟沟底，见图 5-4（c）。其灌水沟的间距正好是玉米的行距，灌水沟的上口宽则为 50cm，这种做法，既可使玉米根部牢固，防止倒伏，又能多蓄水分，增强耐旱能力。宽浅式畦沟结合灌水方法，最适宜于在遭遇天气干旱时，采用“未割先浇技术”，以一水促两料作物。

宽浅式畦沟结合灌水技术的优点：①灌溉水流入浅沟以后，就由浅沟沟壁向畦田土壤侧渗湿润土壤，因此，对土壤结构破坏少；②蓄水保墒效果好；③灌水均匀度高，灌水量小，一般灌水定额 $35m^3$/亩左右即可，而且玉米全生育期灌水次数比一般玉米地还可以减少 1～2 次，耐旱时间较长；④能促使玉米适当早播，解决小麦、玉米两茬作物“争水、争时、争劳”的尖锐矛盾和随后的秋夏两茬作物“迟种迟收”的恶性循环问题；⑤通风透光好，培土厚，作物抗倒伏能力强；⑥施肥集中，养分利用充分，有利于两茬作物获得稳产、高产。这是我国北方广大旱作物灌区值得推广的节水灌溉新技术。但是，它也存在一定缺点，主要是田间沟、畦多，沟和畦要轮番交替更换，劳动强度较大，费工也较多。

5.2.4　沟灌技术

沟灌是我国在地面灌溉中普遍应用于中耕作物的一种较好的灌水方法。近年来，随着田间灌溉现代化的迅速发展，以及节水灌溉技术的研究与推广，传统的沟灌技术已有了很大的改进和提高。

5.2.4.1　沟灌的灌水技术

（1）沟灌特点

沟灌是在作物行间开挖灌水沟，灌溉水由输水沟或毛渠进入灌水沟后，在流动的过程中，主要借土壤毛细管作用从沟底和沟壁向周围渗透而湿润土壤的。与此同时，在沟底也有重力作用浸润土壤。因此，沟灌法与畦灌法相比较，更具有明显的优点。沟灌的主要优点如下。

① 灌水后不会破坏作物根部土壤结构，可以保持根部土壤疏松，通气良好；②不会形成严重的土壤表面板结，能减少深层渗漏，防止地下水位升高和土壤养分流失；③在多雨季节，可以利用灌水沟汇集地面径流，并及时进行排水，起排水作用；④沟灌能减少植株间的土壤蒸发损失，有利于土壤保墒；⑤开灌水沟时还可对作物兼起培土作用，对防止作物倒伏效果显著。但是，沟灌需要开挖灌水沟，劳动强度较大，若能采用开沟机械，则可使开沟速度加快，开沟质量提高，劳动强度减弱。

沟灌适用于灌溉宽行距的中耕作物，如棉花、玉米和薯类等，某些宽行距的蔬菜也采用沟灌，窄行距作物一般不适合用沟灌。沟灌比较适宜的土壤是中等透水性的土壤。

适宜于沟灌的地面坡度一般在 0.005～0.02 之间。地面坡度不宜过大，否则，水流流速快，容易使土壤湿润不均匀，达不到预定的灌水定额。

（2）沟灌灌水沟的布置及规格

① 灌水沟的种类及布置形式　依地形坡度大小划分，灌水沟有顺坡沟和横坡沟两种。在大多数情况下，灌水沟都沿地面坡度方向，即基本上垂直于地面等高线，故称顺坡沟。但是，若地面坡度较大时，也可使灌水沟与地面坡度方向成锐角，使灌水沟能获得适宜的比降，以有利于在田间自流灌水，故称横坡沟，又称等高线沟。

依灌水沟断面尺寸及沟深划分，灌水沟有深灌水沟和浅灌水沟两种。深灌水沟常用于灌溉多年生深根行播作物，浅灌水沟一般适用于土壤下渗速度较缓慢的土质及窄行距作物。一般认为，灌水沟深度大于 0.25m，底宽大于 0.3m 的灌水沟，称为深灌水沟，沟深小于 0.25m，底宽小于 0.3m 的灌水沟，称为浅灌水沟。

依灌水沟沟尾是否封闭划分，有封闭沟和流通沟两种。

我国沟灌技术主要采用封闭沟灌水，基本布置形式见图 5-5。流通沟在国外自动化沟灌系统中常用，但需要尾水回收再利用系统，以及相应的回收再利用装置（见图 5-6）。我国细流沟灌的灌水沟仍可以归属于封闭沟类型，主要是因为实施中其灌水沟尾经常用低土埂适当封堵，以防万一灌水控制不当，发生沟尾泄水流失现象，但其灌水沟中一般放水停止后将不存蓄灌溉水。

② 灌水沟的规格　灌水沟的规格主要指灌水沟的间距，灌水沟的长度和灌水

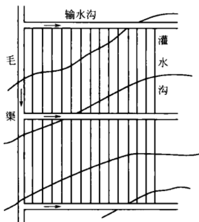


图 5-5　封闭灌水沟布置

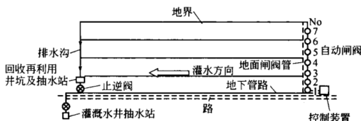


图 5-6　流通沟自动回收尾水再利用系统

沟的断面结构等。灌水沟规格的确定是否合理，将对沟灌灌水质量、灌水效率、土地平整工作量以及田间灌水沟的布置等影响很大，应依据沟灌田间试验资料和群众沟灌灌水实践经验认真分析研究，合理确定。

③ 灌水沟的间距　灌水沟的间距，也就是沟距，应和沟灌的湿润范围相适应，并应满足农业耕作和栽培上的要求。见图 5-7。

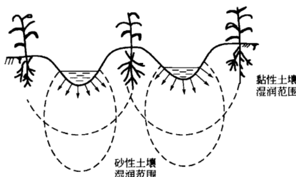


图 5-7　灌水沟水流湿润范围

为了使土壤湿润均匀，灌水沟的间距应使土壤的浸润范围相互连接。因此，在透水性较强的轻质土壤上，其灌水沟沟距应较窄；而透水性较弱的重质土壤上，其沟距应适当加宽。不同土质条件下的灌水沟间距见表 5-10。陕西省总结各灌区不同土质条件下的灌水沟间距见表 5-11。

表 5-10　不同土质灌水沟间距

土　质	灌水沟间距/cm
轻质土壤	50～60
中质土壤	65～75
重质土壤	75～80

表 5-11　陕西省各地不同土质灌水沟间距

土　质	灌水沟间距/cm
砂壤土	45～60
黏壤土	60～75
黏土	75～90

为了保证一定种植面积上栽培作物的植株数目，在一般情况下，灌水沟间距应尽可能与作物的行距相一致。作物的种类和品种不同，其所要求的种植行距也不相同。因此，在实际操作中，若根据土壤质地确定的灌水沟间距与作物的行距不相适应时，应结合当地具体情况，考虑作物行距要求，适当调整灌水沟的间距。

④ 灌水沟的长度　灌水沟的长度与土壤的透水性和地面坡度有直接关系。地面坡度较大，土壤的透水性能较弱时，灌水沟长度可以适当长一些。而在地面坡度较小，土壤透水性较强时，要适当缩短灌水沟沟长。根据灌溉试验结果和生产实践经验，一般砂壤土上的灌水沟长度约 30～50m，黏性土壤上的沟长在 50～100m 左右。蔬菜作物的灌水沟长度一般较短，农作物的沟长较长。但灌水沟长度不宜超过 100m，以防止产生田间灌水损失及影响田间灌水质量，为提高田间灌溉水有效利用率和灌水均匀度奠定基础。

（3）灌水沟的断面结构

灌水沟的断面形状一般为梯形和三角形。其深度与宽度应依据土壤类型、地面坡度以及作物的种类等确定。为防止实施沟灌时出现“沟漫灌”浪费灌溉水量的现象，通常对于棉花，因行距较窄（平均行距一般 0.55m 左右），要求小水浅灌，故多采用三角形断面，见图 5-8（a）。对于玉米，多采用梯形断面，见图 5-8（b）。梯形断面的灌水沟，上口宽为 0.6～0.7m，沟深 0.2～0.25m，底宽 0.2～0.3m；三角形断面的灌水沟，上口宽为 0.4～0.5m，沟深 0.16～0.2m。对于土壤有盐碱化的地区，由于灌水沟的顶部（即沟垄）容易聚积盐分，可以把作物种植在灌水沟的侧坡部位，以避免盐碱威胁作物生长发育。梯形断面灌水沟实施灌水后，往往会改变成为近似抛物线形断面，见图 5-8（c）所示。

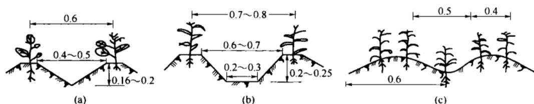


图 5-8 灌水沟剖面图（单位：cm）

（4）沟灌灌水技术

沟灌湿润土壤的过程和原理基本上与畦灌相同。沟灌灌水技术主要是控制和掌握灌水沟长度与输入灌水沟的单沟流量。灌水沟长度与入沟流量都与土壤的透水性能、地形坡度以及灌水定额和灌水沟的形状等因素有关，而且它们之间也是互相制约的。

封闭沟灌在灌水停止后，其灌水沟中的流动水流一般有两种情况：沟中水流除在灌水期间渗入到土壤中的一部分水量外，还在沟中存蓄一部分水量；沟中水流在灌水期间全部下渗到土壤计划湿润层深度内，灌水停止后，沟内不存蓄水量。

$$maL=(b_0h+p_0\overline{K}_tt)L \tag{5-17}$$

式中 h——灌水沟中的平均蓄水深度，m，

a——灌水沟的间距，m：

m——灌水定额，m；

L——沟长，m；

b_0——灌水沟中的平均水面宽度，m；

p_0——灌水沟的平均有效湿润周长，m；

t——灌水时间（不考虑滞渗），h；

$\overline{K}_t$——t 时间内的土壤平均入渗速度，m/s。

封闭灌水沟的沟长与地面坡度及沟中水深的关系，用下述计算式表示：

$$L=\frac{h_2-h_1}{i} \tag{5-18}$$

式中　h_1——灌水停止时封闭灌水沟的沟首水深，m；

h_2——灌水停止时封闭灌水沟的沟尾水深，m，

L——沟长，m；

i——灌水沟的坡度。

当灌水沟的沟长与入沟流量已知时，灌水时间与其他灌水要素间的关系为

$$qt=maL \tag{5-19}$$

式中　q——灌水沟流量，m^3/s；

其余符号意义同前。

对于第二种情况，封闭灌水沟各灌水技术要素之间有如下关系：

在灌水时间内的入渗水量等于计划的灌水定额，即

$$maL=p_0K_1tL=p_0K_0t^{1-\alpha}L \tag{5-20}$$

所以

$$t=\left(\frac{m}{K_0p_0}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \tag{5-21}$$

此处计算的时间 t，实质上是沿灌水沟各点处湿润土壤均匀并达到计划灌水定额所需要的入渗时间，与畦灌同理，若不考虑滞渗时间，则可近似认为是沟口的放水时间，一般不会产生较大的偏差。

灌水流量与沟长的关系同式 (5-19)。根据目前我国各地封闭沟沟灌实践经验，不同土壤、灌水定额和地面坡度等条件下的灌水沟长度见表 5-12。入沟流量一般为 0.5～3.0L/s。为使入沟流量适当，可根据田间毛渠或输水沟的流量大小，调整同时开口放水的灌水沟数目。表 5-13 为河南引黄灌区沟灌技术要素表，可供选用参考。陕西省洛惠渠灌区沟灌试验结果，在轻壤土上，灌水沟坡度为 1/800～1/1000 时，较为适宜的入沟流量、灌水沟长度和灌水定额之间的关系参见表 5-14。

为保证沿灌水沟长度各点湿润土壤均匀，就必须控制其各点处的土壤入渗时间大致相等；在沟灌生产实践中，灌水时间的控制方法与畦灌方法相同，即采用及时封沟改水的改水成数的方法。根据沟灌灌水定额，土壤透水性以及灌水沟的纵坡，沟长和入沟流量等条件，改水成数可采用七成、八成或九成封沟改水，或满沟封口改水等方法。一般地面坡度大，入沟流量大或土壤透水能力小的地区，改水成数应取低值，反之应选取较大的改水成数。

表 5-12　不同土壤、灌水定额和地面坡度条件下的灌水沟长度　　单位：m

不同土壤的灌水定额 /(m^3/hm^2) / 地面坡度	黏壤土			中壤土			轻壤土		
	375	450	525	375	450	525	375	450	525
0.001	30	35	45	20	25	35	20	25	30
0.001～0.003	35	40	60	30	40	55	30	45	50
0.004	50	65	80	45	60	70	45	50	60

表 5-13　河南省引黄灌区灌水沟与流量关系

土壤透水性	沟底比降	沟长/m	灌水沟流量/(L/s)	沟中水深与水深比
弱	0.01～0.004	60～80	0.6～0.9	1/3 以下
	0.004～0.002	40～60	0.7～1.0	2/3 以下
	<0.002	30～40	1.0～1.5	2/3 以下
中	0.01～0.004	80～100	0.4～0.6	1/3 以下
	0.004～0.002	70～90	0.5～0.6	1/3 以下
	<0.002	40～60	0.7～1.0	2/3 以下
强	0.01～0.004	90～120	0.2～0.4	1/3 以下
	0.004～0.002	80～100	0.4～0.5	1/3 以下
	<0.002	50～80	0.5～0.6	2/3 以下

表 5-14　不同入沟流量和灌水定额下的灌水沟长度　　单位：m

灌水定额/(m^3/hm^2)	入沟流量/(L/s)								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
600	31.7	28.7	26.4	24.5	23.1	21.8	21.0	20.4	20.0
750	40.0	34.5	28.7	28.7	26.8	25.3	23.9	22.7	21.7
1050	42.0	35.8	30.0	30.0	28.3	26.0	26.0	25.3	24.8
1500	44.0	37.5	30.8	30.8	29.1	28.5	28.5	28.4	29.0

5.2.4.2　实施沟灌应注意的问题

在干旱、半干旱地区的灌区，实施沟灌应特别注意以下 4 个问题：①正确确定开沟时间；②留足行距，保证开沟质量；③认真组织实施沟灌；④抓紧灌后中耕、蓄水保墒。

5.2.5　涌流灌溉

涌流灌溉，又称波涌灌溉或间歇灌溉。涌流灌溉是把灌溉水断续地按一定周期向灌水沟（畦）供水，逐段湿润土壤，直到水流推进到灌水沟（畦）末端为止的一种节水型地面灌溉新技术。特别适宜在我国旱作灌区农田地面灌溉推广应用。

5.2.5.1　涌流灌溉的灌水方式及系统

（1）涌流灌溉的灌水方式

目前，涌流灌溉的田间灌水方式主要有三种。

① 定时段-变流程方式　也称时间灌水方式。在灌水的过程中每个灌水周期（一个供水时间和一个停水时间构成一个灌水周期）的放水流量和放水时间一定，而每个灌水周期的水流推进长度则不相同。这种方式对灌水沟（畦）长度小于400m 的情况很有效，目前在实际灌溉中，涌流灌溉多采用此种方式。

② 定流程-变时段方式　也称距离灌水方式。是每个灌水周期的水流新推进的

长度和放水流量相同，而每个灌水周期的放水时间不相等，对灌水沟（畦）长度大于 400m 的情况效果更佳。

③ 定流程-变流量方式　也称增量灌水方式。这种灌水方式是以调整控制灌水流量来达到较高灌水质量的一种灌水方式。这种方式是在第一个灌水周期内增大流量，使水流快速推进到灌水沟（畦）总长度的 3/4 的位置处停止供水。然后在随后的几个灌水周期中，再按定时段-变流程方式或定流程-变时段方式，以较小的流量来满足计划灌水定额的要求。主要适用于土壤透水性能较强的条件。

（2）涌流灌溉的田间灌水系统

涌流灌溉需要向灌水沟（畦）间歇性地交替放水和停水，这可以通过人工控制或自动控制实现。但是，人工灌水工作人员的劳动强度非常繁重，因此，涌流灌溉应尽可能配备自动化程度较高的专用控制装置和带阀门的管道。

当前，涌流灌溉田间灌水系统基本上有两类。它们只局限应用于涌流沟灌。

①“双管”涌流灌溉田间灌水系统　“双管”田间灌水系统（图 5-9），一般通过埋于地下的暗管管道把水输送到田间，再通过竖管和阀门与地面上带有阀门的管道相连。这种阀门可以自动地在两组管道间开关水流，故称“双管”。通过交替控制两组间的水流就可以实现间歇供水。当这两组灌水沟结束灌水后，灌水工作人员可将全部水流引到另一放水竖管处，进行下一组涌流灌水沟的灌水。

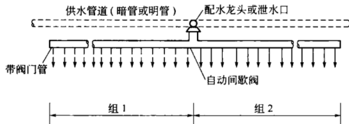


图 5-9　沟灌双管涌流灌溉

②“单管”涌流灌溉田间灌水系统　“单管”田间灌水系统（图 5-10）通常是由一条单独带阀门的管道与供水处相连接（故称“单管”），管道上的各个出水口则通过低水压、低气压或电子阀控制，而这些阀门均以一字形排列，并由一个控制器控制整个系统。

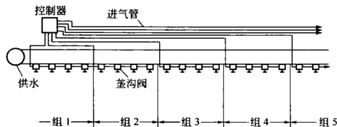


图 5-10　单管涌流灌溉系统

5.2.5.2 涌流灌溉灌水技术

涌流灌溉可以划分为涌流沟灌和涌流畦灌两类。它们与传统的连续沟、畦灌的最主要区别就在于，在一次灌水过程中包含有几个供水和停水阶段。

涌流沟（畦）灌灌水技术要素主要有四项：①单沟或单宽放水流量；②周期放水时间；③灌水周期数；④循环率等。

涌流沟、畦灌的一个放水和停水过程就构成一个灌水周期。周期放水时间与停水时间之和称为周期时间，而放水时间与周期时间之比则称为循环率。完成涌流沟、畦灌灌水全过程所需要的放水和停水过程的次数称为周期数。

涌流灌溉灌水技术要素是影响涌流灌溉灌水效果的重要参数，一般应通过灌水试验或参考类似条件下的实践经验确定，若无上述资料，也可应用理论分析方法或经验分析方法确定或参照表 5-15。

表 5-15 泾惠渠灌区涌流畦灌灌水实施方案（适宜作物头次灌溉）

畦长/m	坡度/‰	单宽流量/[L/(s·m)]	周期数	循环率	畦长/m	坡度/‰	单宽流量/[L/(s·m)]	周期数	循环率
160（左右）	2 左右	10～12	2	1/2	160（左右）	2 左右	6～8	2	1/3
	3～4	8～10	2	1/2 或 1/3		3～4	4～6	2	1/2 或 1/3
	5 左右	4～8	2	1/3		5 左右	3～5	2	1/2
240（左右）	2 左右	12～14	3	1/3	240（左右）	2 左右	8～10	3	1/3
	3～4	10～13	3	1/2 或 1/3		3～4	6～8	3	1/2 或 1/3
	5 左右	6～10	3	1/2		5 左右	4～6	3	1/2
320（左右）	2 左右	12～14	3 或 4	1/3	320（左右）	2 左右	10～12	3 或 4	1/3
	3～4	10～12	3	1/2 或 1/3		3～4	8～10	3	1/2 或 1/3
	5 左右	8～10	3	1/2		5 左右	6～8	3	1/2

5.2.6 节水型沟灌技术

目前，我国北方灌区实施沟灌的主要问题是，不严格按沟灌灌水技术要求灌水，采用大水沟漫灌，浪费水十分严重。节水的沟灌灌水技术主要有以下几种，其特性及相关情况见表 5-16 所示。

5.2.7 果园地面灌溉

果树的一切生命活动都与水有密切的关系，不仅在果树的整个营养生长时期，需要有足够的水分供应，就是在休眠时期，也需要有一定的水分供应。无论何种类型和特点的果园，合理地进行及时而适量的灌溉，是果园管理中极为重要的一项措施。果园灌溉可以促进果树生长健壮，结果早，高产稳产，品质优良。

表 5-16　节水型沟灌技术方法

节水型沟灌方法	适宜条件	技术参数
封闭式直形沟	土壤透水性较强、地面坡度较小	沟距 0.6～0.7m； 沟长为 30～50m； 流量 0.5～1.0L/s
方形沟	地形较复杂，地面坡度大	坡度 1/50～1/200 沟长 2～10m
锁链沟		坡度 1/200～1/600
八字沟	设引水沟，向多沟分水	
细流沟灌	垄植沟灌 沟植沟灌 混植沟灌	单沟流量为 0.1～0.3L/s 中、轻壤土，地面坡度在 0.01～0.02 时，一般控制在 60～120m 沟底底宽为 12～13cm
沟畦灌	以三行作物为一个单元	
播种沟灌	沟播作物播种缺墒时灌水	
沟漫灌 字形沟灌	水稻田地区在水稻收割后种植旱作物的一种灌水方法	
隔沟灌	于旱地区，宽窄行种植	宽行间的灌水沟实施灌水，而窄行间的沟则不进行灌水

果园灌溉，不仅影响果树当年的生长结果状况，而且也会影响来年的果树生长结果状况，甚至还会影响果树的寿命。因此，对果园必须进行合理的灌溉。

5.2.7.1　果树灌溉制度

果树灌溉制度与大田农作物的灌溉制度相同，同样都由灌水时间、灌水次数、灌水定额和灌溉定额四个部分组成。果树的灌溉制度随果树的种类、品种和种植地区不同而有很大的差异，必须针对具体的果树种类和品种，以及种植区的自然条件正确地制定。

（1）果树灌水时间的确定

正确的果树灌水时间，应在果树未受到缺水影响以前就进行灌溉，而不要等到果树已从形态上显露出缺水时。例如果实出现皱缩，叶片发生卷曲时才进行灌溉，此时，已对果树的生长和结果造成不可弥补的损失。

确定果树灌水时间的主要根据，是果树在生长期内各个物候期的需水要求及当时的土壤含水率。一般认为，在果树生长期的前半期，应供水充足，以利生长发育和结果；在果树生长期的后半期，要适当控制水分，以使果树停止生长，适时进入休眠期，作好越冬准备。根据各地的气候特点和果树各个物候期的需水特征，一般可把果树的适宜灌水时间概括为以下 4 个主要灌水时期。

① 花前水，又称催芽水。一般可在萌芽前后进行灌水，但以提前尽早灌水效果更好。

② 花后水，又称催梢水。一般可在落花后 15 天至生理落果前进行灌水。在南

方多雨地区，此时期正值梅雨季节，应特别注意果园的排水工作。

③ 花芽分化水，又称成花保果水。就多数主要落叶果树而言，此时正值果实迅速膨大期及花芽大量分化期，应及时灌水。

④ 休眠期灌水，即冬灌。一般在土壤结冰前进行冬灌，可起到防旱御寒作用，以保证果树安全越冬，且有利于花芽发育，并在土壤中储足水分，促使肥料分解，有利于果树次年春天生长。我国北方地区，冬春比较干旱，更有必要进行冬灌。

（2）果树灌水次数及灌水定额的确定

果树在各个物候期内的灌水次数主要取决于各个时期的降水量和土壤内的水分状况。在一般年份的上述各个灌水时期通常需各灌水一次，即可满足果树该时期的需水要求。但是，若果园内土壤含水量降低到田间持水量的50%时，则必须及时进行灌水。

果树的灌水定额依果树的种类、品种和砧木特性，树龄大小，以及土质、气候条件而有不同。耐旱树种，如红枣、板栗等及砧木对水分要求较低的树种，灌水定额可以小一些。耐旱性较差的树种，如葡萄、苹果、梨等，灌水定额应大一些。砂地果园，保水力差，宜采用小水勤灌，以免水分和养分流失。幼树少灌水，结果果树可多灌水。盐碱地果园灌水应注意地下水位上升，以防止返盐、返碱。一般成年果树一次最适宜的灌水量，应以水分完全湿润果树根系范围内的土层为原则。灌水定额的计算方法与大田农作物灌水定额的计算方法完全相同，但土壤计划湿润层深度一般应采用1.0m。若果园内还套种有中耕作物和绿肥作物，其灌水定额应增加30%～50%，若种植牧草，需多灌约75%～100%的水量。果园适宜灌水量应使土壤含水量达到田间持水量的60%～80%为宜。

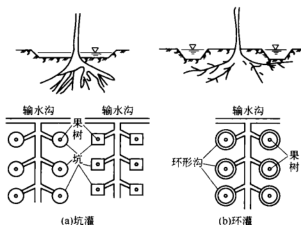
5.2.7.2 果园地面灌水技术

在果园有条件时应尽量采用喷灌、微灌等先进灌水方法。但目前我国绝大多数果园仍以采用地面灌溉为主要灌水方法。果园地面灌水方法大致有以下几种。

① 坑灌　在每棵果树树干周围的地上，用土埂围成圆形或方形坑，由输水沟或输水管道引水入坑的灌水方法，称坑灌。坑灌又称盘灌，如图5-11（a）所示。

② 分区（格田）灌　在果树间筑土埂，埂高一般约15～20cm，把果园划分成许多长方形或正方形的小区，由输水沟向各小区供水灌溉的方法，称分区灌。一般一棵树为一个独立的小区。这种灌水方法能使灌溉水充分与果树根系相接触，整个根系受水均匀。但其主要缺点是，破坏土壤结构，使土壤表面板结，需培筑许多纵横土埂，既费劳力又妨碍机械化耕作。

③ 环灌　修筑直径为树冠直径2/3～3/4并带有土埂的环形沟，由输水沟向环形沟供水灌溉的方法，称环灌。环灌湿润土壤的范围较小，主要湿润果树根系群部分的土壤，因此灌水量较小，用水较经济。此外，环灌对土壤结构的破坏也较少，但对机械化耕作仍有一定妨碍。环灌多应用于幼龄果树，是一种较好的果园节水地面灌水方法。环灌如图5-11（b）所示。



(a)坑灌　(b)环灌

图 5-11　果树坑灌及环灌

④ 沟灌　沟灌是果园地面灌溉中较为合理的灌水方法（图 5-12）。沟灌是在整个果园的果树行间开灌水沟，由输水沟或输水管道供水灌溉。轻质土壤沟距为60～70cm；壤土和轻壤土，沟距为 80～90cm；中黏重土壤上的沟距为 100～120cm。

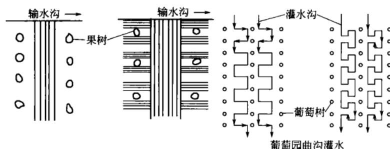


图 5-12　果树沟灌布置

灌溉结束，可以将灌水沟填平。灌水沟的深度取决于灌水沟距果树树干的远近而定，距离树干远的灌水沟应深些，离树干近的灌水沟应浅些。一般灌水沟深约 20～25cm，近树干的灌水沟沟深约 12～15cm。灌水沟的单沟流量通常为 0.5～1.0L/s。沟的比降应不致使灌水沟遭受冲刷。在坡度较陡的地区，灌水沟可接近平行于等高线布置。灌水沟的长度，在土层厚、土质均匀的果园，可达 130～150m；若土层浅、土质不均匀，沟长不宜大于 90m。灌水沟除在果树行间开挖封闭式纵向深沟外，也可由纵沟分出许多封闭式的横向短沟，以布满树根所分布的面积上。短沟长度：3～5 年的果树为 3～4m；5～6 年的果树为 4～6m。短沟沟距一般为 1.0m，沟深约 15～20cm，距树干最近的沟应离树干 50cm 以上。灌水沟还可以采用弯曲形沟布置形式，如图 5-12 所示。

沟灌的主要优点是，湿润土壤均匀，灌溉水量损失小，可以减少土壤板结和对土壤结构的破坏，土壤通气良好，并方便机械化耕作。因此，沟灌是果园较合理而

又节水的一种地面灌水方法。

我国南方雨水较多，一般平地果园均需开挖排水沟，以利果园排水。但在干旱时也可利用此类排水沟，进行蓄水浸灌，而无需再另开挖灌水沟。“一沟”灌排两用，既节水又少占地，增产效果很显著。

⑤ 穴灌　在树冠下挖穴，向穴内灌水的方法，称穴灌。开挖穴数随树冠大小而增减，一般采用 10 个左右。穴深一般 60～80cm，直径约 30cm，多采用于山丘地区。

近年来，在果园中广泛推广采用塑料穿孔灌水管道与地面灌水方法相结合的灌水方法，可显著提高灌水效率和灌溉水有效利用率及灌水质量。

5.2.8　地膜覆盖灌水技术

地膜覆盖灌水，是在地膜覆盖栽培技术基础上，结合传统地面灌水沟、畦灌溉所发展的新式节水型灌水技术。

利用塑料薄膜覆盖作物的栽培技术（简称地膜栽培技术），最早起始于 1955 年的日本，到 1976 年已在日本全国推广应用面积达 2×10^5 hm²。法国于 1956 年开始示范推广采用，到 1976 年已达 3.5×10^3 hm²。美国、意大利等国也都相继采用了这项技术，我国则于 1979 年由日本引进，现已在我国北方大面积推广应用。尤其在干旱地区的棉花、瓜果和蔬菜等经济作物的种植，都基本采用了地膜覆盖栽培技术，例如新疆地膜栽培面积已超过 1.0×10^6 hm²（1500 万亩），其中棉花约占 7×10^5 hm²（1050 万亩）。

新疆在 20 世纪 80 年代初引进地膜覆盖栽培技术后，近十年来又在地膜覆盖栽培的基础上，研究发明了新的地膜覆盖灌水方法，它包括膜侧、膜上和膜下等三类灌水方法。其中膜上灌，也称膜孔灌溉，是在膜侧灌溉的基础上，改垄背铺膜为沟（畦）中铺膜，使灌溉水流在膜上流动，通过作物放苗孔或专用灌水孔渗入到作物根部的土壤中。膜孔灌的形式由 1987 年的扶埂膜上灌，发展到现在的膜孔沟灌、膜孔畦灌、宽膜膜孔畦灌，以及膜孔畦格田灌、膜缝灌和喷灌膜孔灌等多种形式。正是由于膜上灌溉的蓬勃发展，覆膜宽度由 70cm 窄膜发展到现在的 180cm 宽膜，田间地膜覆盖率由 60%上升到 90%。目前新疆膜上灌溉面积已发展到 2×10^5 hm²（300 万亩），而膜孔灌的作物已由棉花发展到玉米、瓜菜、甜菜、啤酒花、小麦、高粱和葡萄等十多种作物，地区也由新疆发展到北方的甘肃、宁夏、河南、河北等地。

5.2.8.1　地膜覆盖灌水的类型及其特征

（1）揭膜畦、沟灌

揭膜畦、沟灌是棉麦兼作“一膜两盖”，并结合低定额灌水，而形成的一套节水型棉麦两种作物地膜覆盖栽培灌水新技术。据河北省黑龙港地区经验，这种技术采用麦田垄宽为 40cm，棉田垄宽为 80cm，并要求棉垄高出麦垄约 10cm。一般，

在霜降播种小麦时要浇足底墒水，并边播种边覆盖地膜，到来年初春（大致 3 月 20 日左右）揭膜，这样就省去了冬灌和返青水。在揭膜后，应追肥灌拔节水和抽穗水。

在浇灌小麦抽穗水的同时，也就浸润了播种前的棉田，而省去了棉田播前水。棉花播种时仍利用覆盖麦田的塑料薄膜，立即再覆盖棉田，以后就再不揭膜。据试验，“一膜两盖”遇平水年时，棉花只需浇灌一次苗期水；若遇偏旱年，则再浇灌一次现蕾水，之后进入雨季，就不再需要灌水，并可确保丰收。据河北省黑龙港地区六年的试验，在平水年时棉麦两季用水的灌水定额仅 $1575m^3/hm^2$，但可收获皮棉 $750\sim1020kg/hm^2$ 和小麦 $3000\sim3750kg/hm^2$。

（2）膜侧沟灌

地膜覆盖的传统灌溉方法是膜侧沟灌技术。膜侧沟灌是指在灌水沟垄背部位铺膜，灌溉水流在膜侧的灌水沟中流动，并通过膜侧入渗到作物根系区的土壤内。膜侧沟灌灌水技术要素与传统的沟灌相同。这种灌水技术适合于垄背窄膜覆盖，一般膜宽 50～90cm。膜侧沟灌方法主要用于条播作物和蔬菜。该技术虽说能增加垄背部位种植作物根系的土壤温度和湿度，但灌水均匀度和田间水有效利用率与传统沟灌基本相同，没有多大改进，且裸沟土壤水分蒸发量较大。

（3）膜上灌溉

膜上灌溉技术主要有以下几种类型，各种方法简述见表 5-17。

表 5-17　膜上灌溉技术

名称	技　术　简　介
开沟扶埂膜上灌	畦长为 80～120m，入膜流量 0.6～1.0L/s，埂高 10～15cm，沟深 35～45cm
打埂膜上灌	铺膜同时在地表 5～8cm 厚的土层，在畦田侧向构筑成高 20～30cm 的畦埂。其畦田宽 0.9～3.5m，膜宽 0.7～1.8m。根据作物栽培的需要，铺膜形式可分为单膜或双膜，对于双膜，其中间或膜两边各有 10cm 宽的渗水带

续表

名称	技术简介
膜孔灌溉	地膜两侧必须翘起5cm高，并嵌入土埂中，双行种植一般采用宽70～90cm的地膜；三行或四行种植一般采用宽180cm的地膜。灌溉水经过膜孔进入田间，入膜流量为1～3L/s。 蔬菜一般沟深30～40cm，沟距80～120cm；西瓜和甜瓜的沟深为40～50cm，上口宽80～100cm，沟距350～400cm。专用灌水孔可根据土质不同打单排孔或双排孔，对轻质土地膜打双排孔，重质土地膜打单排孔。对轻壤土、壤土以孔径5mm、孔距为20cm的单排孔为宜。对蔬菜作物入沟流量以1～1.5L/s为宜。
膜缝灌	① 膜缝沟灌　将地膜铺在沟坡上，沟底两膜相会处留有2～4cm的窄缝，通过放苗孔和膜缝向作物供水，膜缝沟灌的沟长为50m左右。多用于蔬菜 ② 膜缝(孔)畦灌　是在畦田田面上铺两幅地膜，畦田宽度为稍大于2倍的地膜宽度，两幅地膜间留有2～4cm的窄缝。水流在膜上流动，通过膜缝和放苗孔向作物供水。入膜流量为3～5L/s，畦长以30～50m为宜，要求土地平整 ③ 细流膜缝灌　是在普通地膜种植下，用机械将作物行间地膜轻轻划破，并将膜缝压成一条U字形小沟，灌水时水在沟中流动，同时渗入到土中。入沟流量很小，一般流量控制在0.5L/s为宜。细流膜缝沟灌适用于1%以上的大坡度地形区。
格田膜上灌	将土地平整成网格式的畦田。每块畦田大者20亩，小者几亩，每块格田内要平整得特别水平，然后铺膜灌溉。它适用于稻田膜上灌
温室涌流膜孔沟灌	系统由蓄水池、倒虹吸控制装置、多孔分水软管和膜孔沟灌组成。该系统不仅可以进行间歇灌溉，而且还可以进行施肥灌溉和温水灌溉，同时提高地温和减少温室的空气湿度，有利于提高作物产量和防治病害的发生

(4) 膜下灌溉

膜下灌溉一般分为膜下沟灌和膜下滴灌。膜下沟灌是将地膜覆盖在灌水沟上，灌溉水流在膜下的灌水沟中流动，以减少土壤水分蒸发。其入沟流量、灌水技术要素、田间水有效利用率和灌水均匀度与传统的沟灌相同。该技术主要使用于干旱地区的条播作物上。温室灌溉用该技术可以减少温室的空气湿度，减少和防治病害

发生。

膜下滴灌主要是将滴灌带管铺设在膜下，以减少土壤棵间蒸发，提高水的利用效率。该技术更适合于干旱半干旱地区。

5.2.8.2. **膜孔沟（畦）灌溉技术**

（1）膜孔沟（畦）灌溉技术要素的确定

目前地膜覆盖灌溉多采用膜孔沟（畦）灌的形式。膜孔沟（畦）灌属于局部浸润灌溉。为保证作物根系区土层中具有足够的渗水量，以满足作物生长对水分的需要，就必须根据不同的地形坡度，各种土质的膜孔渗吸速度和田间持水量等因素来确定膜孔沟（畦）灌溉的技术要素，其技术要素主要有入膜流量、改水成数、开孔率、膜孔布置形式和灌水历时。

膜孔沟（畦）灌的入膜流量，指单位时间内进入膜沟或膜畦首端的水量，常以 L/s 为单位。入膜流量的大小主要根据沟（畦）宽度、土壤质地、地面坡度和单位长度膜孔入渗强度的大小等确定。一般应根据田间不同入膜流量的水流行进过程实测资料，建立行进过程图解方程，并评价其灌水均匀度和田间水有效利用率等，来确定最佳入沟（畦）流量。无实测资料时，也可采用式（5-22）计算入膜流量：

$$q=0.001Knv\omega$$

$$\omega=\frac{nd^2}{4}SLN \tag{5-22}$$

式中 q——入膜流量，又称灌水强度，L/(h·m)，即单位时间单位膜宽上的灌水量；

K——旁侧入渗影响系数，它与膜上水深成正比，与膜畦长度成反比，对无旁渗的打埂膜上灌，一般取值为 1.46～3.86 之间，平均为 2.66；

n——每米膜长上的灌水孔数，包括放苗孔和增设的专用灌水孔的孔数在内；

v——土壤的入渗速度，随灌水次数的增加而减少，依田间实测确定，cm/h；

ω——放苗孔和专用灌水孔的平均面积，cm^2；

d——放苗孔或灌水孔孔径（直径），cm；

S——孔距，cm；

L——膜沟（畦）长度，cm；

N——孔口排数，单排孔 $N=1$，双排孔 $N=2$。

例如，若已知某田块 $n=27$，$\omega=8cm^2$，实测 $v=8cm/h$，取 $K=2.66$，则该田块的入膜流量为 $q=0.001\times2.66\times27\times8\times8$L/(h·m) =4.6L/(h·m)。

改水成数是指沟（畦）首停水时膜孔沟（畦）灌溉水流推进长度占总沟（畦）长度的比例，一般对于坡度较平坦的膜孔沟（畦）灌改水成数为 1，对坡度较大的膜孔沟（畦）灌要考虑取改水成数 0.8～0.95。若有些膜孔沟（畦）灌溉达不到灌水定额时，则要考虑允许尾部泄水以延长灌水历时。

沟（畦）宽度主要根据栽培作物的行距和薄膜宽度、耕作机具等要求确定。目前棉花和小麦的膜沟（畦）灌分单膜和双膜，地膜宽度一般为 120～180cm。其技术要素组合见表 5-18。

表 5-18 膜孔沟畦灌技术要素

地面坡度	膜畦长度/m	单宽流量/[L/(s·m)]
1%	20～25	1.5
6‰	60～80	1.5～2

（2）膜孔沟（畦）灌推广中应注意的主要问题

① 膜孔沟（畦）灌属局部灌溉，由于入渗强度的降低，灌溉时要特别注意满足灌水定额的要求。

② 由于膜孔沟（畦）灌减少了作物棵间土壤蒸发，因此不能采用传统的灌溉制度，应根据实际土壤含水率，确定节水型的优化灌溉制度。

③ 膜孔沟（畦）灌溉改变了一些传统的作物栽培技术措施，因此要采取合理的施肥措施，以解决作物后期的需肥问题。

④ 要注意残膜对土壤及农业生态环境的污染，在作物收割后应尽量回收残膜，或在作物灌一两水后揭膜。目前农户灌溉配水，多为大水定时灌溉，一渠水限定时间灌完一户的田地，农户在指定的时间内，都力争多灌些。而膜孔沟（畦）灌溉是小水渗灌，渗水时间短则不能浸润足够的土壤，因此需要继续试验研究适合当地的膜孔沟（畦）灌溉配水制度。

⑤ 膜孔宽畦灌时，要注意田面横向应平整及纵向比降要均匀，这样才能提高膜孔沟（畦）灌溉质量。

⑥ 有关膜孔沟（畦）灌溉技术参数和栽培方式主要是在新疆自然条件下总结出的一些经验，各地在推广应用时，应研究和总结出适合当地实际情况的膜孔灌溉栽培方式和灌水技术要素，使这一节水灌溉新技术在农业生产中发挥更大的作用。

5.3 管道输水灌溉技术

“七五”以来，国家科委、水利部、各省、市、自治区对井灌区管道输水灌溉技术进行了攻关研究，投入了大量人力、物力。到目前，该项技术日趋成熟，井灌区管道输水灌溉投入较低、效益明显，深受广大农民的欢迎。

管道输水灌溉是以管道代替明渠输水灌溉的一种工程形式，直接由管道分水口分水进入田间沟、畦或分水口连接软管输水进入沟、畦，仍属地面灌溉技术。其特点是出水口流量较大，出水口所需压力较低，管道不会发生堵塞。

管道输水灌溉比土渠输水灌溉有着明显的优点。管道输水减少了输水过程中的渗漏与蒸发损失，井灌区管道系统水利用系数在 0.95 以上，比土渠输水节水 30％

左右，比土渠输水灌溉节能 20%～30%。渠灌区采用管道输水后，比土渠节水 40%左右。

管道输水灌溉由于是有压供水，可适应各种地形，使原来土渠难以达到灌溉的耕地实现灌溉，扩大灌溉面积。大型提水灌区或自流灌区管网系统输水灌溉技术比井灌区的低压管道输水灌溉技术复杂得多，切忌简单套用和照搬井灌区管灌技术。

5.3.1 管道输水灌溉系统的类型与组成

5.3.1.1 输配水管道系统的类型

输配水管道系统分类见表 5-19。

表 5-19　管道输水灌溉分类

分类	方法	特点及应用范围
输配水方式	水泵提水输水系统	水源水位不能满足自压输水，需要利用水泵加压将水输送到所需要的高度，方可进行灌溉。目前，平原井灌区管道系统大部分为水泵直送式
	自压输水系统	利用地形自然落差所提供的水头满足管道系统在运行时所需的工作压力。在渠道位置较高的自流灌区多采用这种形式
管网形式	树状网	管网为树枝状，水流从“树干”流向“树枝”，即在干管、支管、分支管中从上游流向末端，只有分流而无汇流
	环状网	管网通过节点将各管道联结成闭合环状网。根据给水栓位置和控制阀启闭情况，水流可作正逆方向流动
固定方式	移动式	除水源外，管道及分水设备都可移动，机泵有的固定，有的也可移动，管道多采用软管，简便易行，一次性投资低，多在井灌区临时抗旱时应用。但是劳动强度大，管道易破损
	半固定式	一般是干管或干、支管为固定地埋管，由分水口连接移动软管输水入田间。这种形式介于移动式和固定式之间，比移动式劳动强度低，但比固定式管理难度大，经济条件一般的地区，宜采用半固定式系统
	固定式	管灌系统中的各级管道及分水设施均埋入地下，固定不动
管道输水压力	低压	其最大工作压力一般不超过 0.2MPa，最远出口的水头一般在 0.002～0.003MPa，该形式对管材承内压要求不高。平原井灌区管道输水灌溉系统采用这种形式
	非低压	工作压力超过 0.2MPa，该形式对管材质量要求较高，一般应选择塑料管、钢筋混凝土管或钢管等，管道系统中的分水、调压等附属设备要求配套齐全，多用在输水量较大或地形高差较大的灌区应用
结构形式	开敞式	在管道上下游高差不太大的一些部位设有自由水面调节井槽的管道系统形式。调节井槽除具有调压作用外，一般还兼有分水式泄水功能。当进行配水时，要调节配水设施下面调节槽井的水位以确保所需要的水头
	半封闭式	半封闭式指在输水过程中，管道系统不完全封闭，在适宜的位置保持自由水面或使用浮球阀控制阀门启闭的一种输水形式。这种形式只要下游闸阀不开启，就不会引起上游水的流动，也不会像开敞式那样产生无效放水
	封闭式	封闭式是指水流在全封闭的管道中从上游管端流向下游管道末端。输水过程中管道系统不出现自由水面。在平原井灌区应用较多

5.3.1.2 管道输水灌溉系统的组成

管道输水灌溉系统由水源与取水工程部分、输水配水管网系统和田间灌水系统三部分组成。

① 水源与取水工程　管道输水灌溉系统的水源有井、泉、沟、渠道、塘坝、河湖和水库等。水质应符合农田灌溉用水标准，且不含有大量杂草、泥沙等杂物。井灌区取水部分除选择适宜机泵外，还应安装压力表及水表，并建有管理房。而在自压灌区或大中型提水灌区的取水工程应设置进水闸、分水闸、拦污栅、沉淀池和水质净化处理设施及量水建筑物。

② 输水配水管网系统　输配水管网系统是指管道输水灌溉系统中的各级管道、分水设施、保护装置和其他附属设施。在面积较大的灌区，管网可由干管、分干管、支管、分支管等多级管道组成。

③ 田间灌水系统　田间灌水系统指分水口以下的田间部分。作为整个管道输水灌溉系统，田间灌水系统是节水灌溉的重要组成部分。田间灌水解决不好，灌水浪费现象将依然存在。灌溉田块应进行平整，畦田长宽适宜。为达到灌水均匀、减小灌水定额的目的，通常将长畦改为短畦或给水栓接移动软管。其中闸管系统是解决向畦中灌水水量损失较好的措施之一。

5.3.2 系统规划与布置

（1）规划的基本原则

① 管道输水灌溉系统规划必须与当地农业区划、农业发展计划、水利规划及农田基本建设规划相适应。在原有农业区划和水利规划的基础上，综合考虑与规划区内沟、渠、路、林、输电线路、引水水源等布置的关系，统筹安排、全面规划，充分发挥已有水利工程的作用。

② 近期需要与远景发展规划相结合。

③ 系统运行可靠。

④ 综合考虑管道系统各部分之间的联系，取得最优规划方案。

（2）规划内容

① 确定适宜的引水水源和取水工程的位置、规模及形式。在井灌区应确定适宜的井位，在渠灌区则应选择适宜的引水渠段。

② 确定田间灌溉工程标准，沟畦的适宜长、宽，给水栓入畦方式及给水栓连接软管时软管的适宜长度。

③ 论证管网类型，研究管网中管道线路的走向与布置方案。确定线路中各控制阀门、保护装置、给水栓及附属建筑物的位置。

④ 拟定可供选择的管材、管件、给水栓、保护装置、控制阀门等设施的系列范围。

（3）规划的主要技术参数

① 灌溉设计保证率　根据当地自然条件和经济条件确定，但应不低于 75%。

② 管道灌溉系统水利用系数　井灌区应不低于 0.95，渠灌区应不低于 0.90。

③ 田间水利用系数　应不低于 0.85。

④ 灌溉水利用系数　井灌区不低于 0.80，渠灌区不低于 0.70。

⑤ 规划区灌水定额　根据当地试验资料确定，无资料地区可参考邻近地区试验资料确定。土壤湿度鉴定参考资料见表 5-20。

表 5-20　指测法鉴定土壤湿度

质地类型	在手掌中研磨时的感觉	用放大镜观察	干燥时状态	湿润时状态	揉捻时的状态
砂土	砂粒感觉	几乎完全由砂粒组成	土粒分散不成团	流砂不成团	不能揉成细条
砂壤土	不均匀、主要是砂粒的感觉，也有细土粒的感觉	主要是砂粒，也有较细的土粒	用手指轻压能碎裂成块	无可塑性	揉成的细条易碎成小段或小瓣
壤土	感觉到砂质和黏质土粒	还能见到砂粒	用手指难于捏破干土块	可塑	能揉成完整的细条，在弯曲成圆环时裂开成小瓣
壤黏土	感到少量砂粒	主要有粉砂或黏粒，几乎没有砂粒	用手指不能压碎干土块	可塑性良好	易揉成细条，卷成圆环时有裂痕
黏土	很细的均质土，难于粉成粉末	均质的细粉末，没有砂粒	形成坚硬的土块，用锤击难于使其粉碎	可塑性良好，呈黏糊体	易揉成细条，卷成圆环时不产生裂痕

(4) 规划步骤

① 调查收集规划前所需要的基本资料、当地农业区划、农业发展计划、水利规划和农田基本建设规划等基本情况，并应进行核实和分析。

② 进行水量平衡分析，确定管道输水灌溉区规模。

③ 勘测并绘制规划区平面图，在图中标明沟、渠、路、林及水源的位置和高程。

④ 确定取水工程位置、范围和形式。

⑤ 进行田间工程布置，确定管网形式和畦田规格。

⑥ 根据管网类型、给水装置位置，选择适宜的管网线路，确定保护设施及其他附属建筑物位置。

⑦ 汇总管网各级管道长度、给水装置、保护设施、管件及其他附属建筑物的数量。

⑧ 选择适宜的管材、给水分水装置及保护设施，对没有性能指标说明的材料和设备应通过试验确定其性能。

(5) 规划成果

规划阶段的成果是包括以下内容的工程规划报告：①概况；②基本情况与资料；③主要技术参数；④水量供需平衡分析；⑤规划方案比较；⑥田间工程布置；⑦投资估算；⑧经济效益分析；⑨附图（1∶5000～1∶10000水利设施现状图、1∶2000～1∶10000管道灌溉工程规划图、1∶1000～1∶2000典型管道系统布置图）。

5.3.3 管网规划布置

管网规划与布置是管道系统规划中关键的一部分。一般管网工程投资占管道系统总投资的70%以上。管网布置得合理与否，对工程投资、运行状况和管理维护有很大影响。因此，对管网规划布置方案应进行反复比较，最终确定合理方案，以减小工程投资并保证系统运行可靠。

5.3.3.1 规划布置的原则

① 井灌区的管网宜以单井控制灌溉面积作为一个完整系统。渠灌区应根据作物布局、地形条件，地块形状等分区布置，尽量将压力接近的地块划分在同一分区。

② 规划时首先确定给水栓的位置。给水栓的位置应当考虑到灌水均匀。若不采用连接软管灌溉，向一侧灌溉时，给水栓纵向间距可在40～50m之间；横向间距一般按80～100m布置。在山丘区梯田中，应考虑在每个台地中设置给水栓以便于灌溉管理。

③ 在已确定给水栓位置的前提下，力求管道总长度最短。

④ 管线尽量平顺，减少起伏和折点。

⑤ 最末一级固定管道的走向应与作物种植方向一致，移动软管或田间垄沟垂直于作物种植行。在山丘区，干管应尽量平行于等高线、支管垂直于等高线布置。

⑥ 管网布置要尽量平行于沟、渠、路、林带，顺田间生产路和地边布置，以利耕作和管理。

⑦ 充分利用已有的水利工程，如穿路倒虹吸和涵管等。

⑧ 充分考虑管路中量水、控制和保护等装置的适宜位置。

⑨ 尽量利用地形落差实施重力输水。

⑩ 各级管道尽可能采用双向供水。避免干扰输油、输气管道及电信线路等。

5.3.3.2 规划布置的步骤

根据管网布置原则，按以下步骤进行管网规划布置：①根据地形条件分析确定管网类型；②确定给水栓的适宜位置；③按管道总长度最短原则，确定管网中各级管道的走向与长度；④在纵断面图上标注各级管道桩号、高程、给水装置、保护设施、连接管件及附属建筑物的位置；⑤对各级管道、管件、给水装置等，列表分类统计。

5.3.3.3 管网布置

管网布置之前，首先根据适宜的畦田长度和给水栓供水方式确定给水栓间距，

然后根据经济分析结果将给水栓连接而形成管网。下面仅介绍井灌区管网布置方法。

当给水栓位置确定时，不同的管道连接形式形成管道总长度不同的管网，因此，工程投资也不同。在我国井灌区管道输水灌溉的发展过程中，许多研究和施工人员根据水源位置、控制范围、地面坡降、地块形状和作物种植方向等条件，总结出如图 5-13～图 5-19 所示的几种常见布置形式。

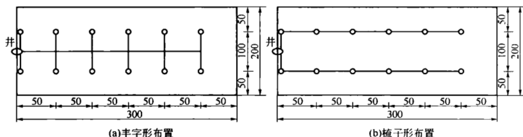


图 5-13　给水栓向一侧分水管道布置

机井位于地块一侧，控制面积较大且地块近似呈方形，可布置成图 5-14 和 5-15所示的形式。这些布置形式适合于井出水量 60～100m³/h，控制面积 10～20hm²，地块长宽比约为 1 的情况。

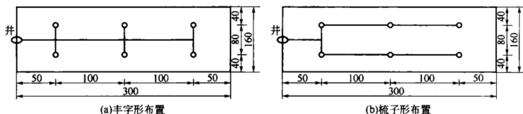


图 5-14　给水栓向两侧分水管道布置

机井位于地块一侧，地块呈长条形，可布置成一字形、L 形、T 字形，如图 5-15～图 5-17 所示。这些布置形式适合于井出水量 20～40m³/h，控制面积 3.33～6.67hm²，地块长宽比不大于 3 的情况。

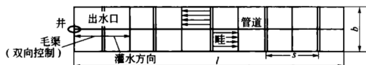


图 5-15　一字形布置

机井位于地块中心时，常采用图 5-18 所示的 H 形布置形式。这种布置形式适合于井出水量 40～60m³/h，控制面积 6.67～10hm²，地块长宽比不大于 2 的情况。当地块长宽比大于 2 时，宜采用图 5-19 所示的长一字形布置形式。

例：形如图 5-19 所示的长方形地块，纵向边长 300m，横向边长 200m，总面

积 6hm²，由单井控制，井位在地块横向边的中间。给水栓呈两行布置，纵向间距 50m，横向间距 100m。试计算两种布置形式的管道总长度。

图 5-16　L 形布置

图 5-17　T 形布置

图 5-18　H 形布置

图 5-19　长一字形布置

解：按丰字形连接支管时，管道总长度：$l=25+50\times5+100\times6=875$m；每亩管道长度 9.7m。若按梳子形连接支管时，管道总长度仅为 $l=25+100+50\times5\times2=625$m；每亩管道长度 7.0m。两种布置形式管道长度相差 250m，丰字形比梳子形可节省管道长度 28.6%。

例：如图 5-20 所示的长方形地块，纵向边长 300m，横向边长 160m，总面积 4.8hm²，由单井控制，井位在地块横向边的中间。给水栓呈两行布置，纵向间距 100m，横向间距 80m。试计算两种布置形式的管道总长度。

(a) 最小生成树　　(b) 修正后生成树

图 5-20　总长度最短树状管网布置示意图

解：按丰字形连接支管时，管道总长度，$J=50+2\times100+3\times80=490$ (m)，每亩管道长度 6.8m。若按梳子形连接支管时，管道总长度为 $J=50+80+4\times100=530$ (m)，每亩管道长度 7.4m。两种布置形式管道长度相差 40m，丰字形比

梳子形可节省管道长度 8.2%。

5.3.4 田间灌水系统布置

田间灌水系统是指给水栓以下的田间沟渠或配水闸管，以及灌水沟畦规格等。输水损失大是造成灌水利用率较低的主要原因，但田间灌水工程标准低也是造成灌溉水浪费的重要原因之一。因此，提高田间灌水工程标准是实现作物合理需水要求、提高整个灌溉系统灌水利用率的一项重要措施。

5.3.4.1 沟畦灌水规格

田间水利用系数、灌溉水储存率和灌水均匀度是评价灌水质量的主要技术指标。在生产实践中，这些技术指标往往难以形成最佳组合。因此，必须根据当地条件合理确定灌水要素。在管灌系统中，田间灌水工程首先要满足标准：

田间水利用系数
$$\eta_{田}=\frac{W_{田}}{W_{净}}\geqslant 0.95 \tag{5-23}$$

灌水均匀度
$$C_u=1-\sum\frac{\Delta Z}{Z}\geqslant 0.95 \tag{5-24}$$

式中　$W_{田}$——灌入田间的水量；

$W_{净}$——田间计划湿润层所需要水量；

Z——灌后土壤中的平均蓄水深度；

ΔZ——沟畦各点实际蓄水深度与平均蓄水深度的离差。

① 畦灌灌水要素　畦灌是水在田面上沿畦田纵坡方向流动，逐渐湿润土壤。畦灌灌水要素应根据灌水定额并结合给水栓出口流量、作物布局、灌水定额和土壤质地等因素通过田间试验确定，或查表 5-21 给出的参考数据。

表 5-21　畦田灌水技术要素

土壤透水性	地面纵坡					
	≤0.002		0.002～0.005		0.005～0.01	
	畦长 /m	单宽流量 /[L/(s·m)]	畦长 /m	单宽流量 /[L/(s·m)]	畦长 /m	单宽流量 /[L/(s·m)]
强	20～50	5～6	30～60	5～6	50～70	4～5
中	30～60	5～6	40～70	4～5	60～80	4～5
弱	40～70	4～5	50～80	3～4	80～100	3～4

② 沟灌灌水要素　对于棉花、玉米、薯类及某些蔬菜等多采用沟灌。沟灌是在作物行间开沟引水，水从输水垄沟或闸管系统进入灌水沟后，借毛管作用力湿润沟两侧土壤，以重力作用浸润沟底土壤的灌水方法。为了保证沟灌质量，应合理地确定沟的灌水要素，即灌水沟的沟距、长度、入沟流量和放水时间。沟灌适宜的地面坡度为 3‰～8‰，坡度过大，水流速度快，不易达到预定的灌水定额。灌水沟的沟距应结合作物行距确定，长度应根据地形坡度大小、土壤透水性及地面平整情

况确定。灌水沟长度一般为 30～50m，最长可达 100m，入沟流量以 0.5～3.0L/s 为宜。可参考表 5-22 选择。

表 5-22 灌水沟适宜规格参数

土壤透水性	地面纵坡					
	≤0.002		0.002～0.005		0.005～0.01	
	沟长/m	流量/(L/s)	沟长/m	流量/(L/s)	沟长/m	流量/(L/s)
强	30～40	1.0～1.5	40～60	0.7～1.0	60～80	0.6～0.9
中	40～60	0.7～1.0	70～90	0.5～0.6	80～100	0.4～0.6
弱	50～60	0.5～0.6	80～100	0.4～0.5	90～120	0.2～0.4

5.3.4.2 沟（畦）输水方式

① 输水垄沟 输水垄沟仍是当前田间灌溉入畦的主要方式，属于末级输水毛渠。田间支管间距一般在 100m 左右，故分水口向一侧分水的输水垄沟长度在 50m 左右。这种输水垄沟是农民长期使用的输水方法，就地挖沟培土，施工简单，开口入畦方便。垄沟底与畦田面保持齐平或稍高于田面，两边培土夯实且高于沟内水面。由于输水距离和时间均较短，产生的输水渗漏损失比较少。

② 闸管系统 闸管系统是代替输水垄沟的一种先进的节水灌溉措施，是管道系统较理想的配套形式。这种方法是将闸管系统与给水栓连接，水通过闸管直接进入畦田，避免了输水垄沟的部分渗漏。国内已开始应用我国自行研制的闸管系统每根长 50m 左右，管径 90～160mm，每隔 4m 开一小放水孔，重量约 3kg，人工卷起移动方便，抗渗水、抗撕裂性能较强。闸管一般与末级输水管道垂直布置，这样可控制较多的畦田。闸管也可与管道平行布置，实行退管灌水。特殊情况时，可将数根闸管连接使用，实现远距离输水。田间移动软管布置形式如图 5-21 所示。

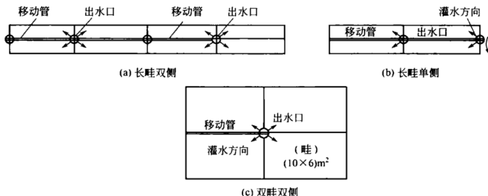


图 5-21 田间移动软管灌水

5.4　喷灌技术

5.4.1　喷灌的特点

喷灌是利用加压设备将灌溉水源加压或利用地形落差将灌溉水通过管网输送到田间，经喷头喷射到空中，形成细小的水滴，均匀喷洒在农田或作物叶面，为作物正常生长提供必要水分条件的一种先进灌水方法。与传统的地面灌水方法相比，喷灌具有明显的特点。

喷灌具有节约用水、节地、增加作物产量、改善农产品品质、节省劳力、适应性强等优点。同时其缺点也非常明显，如受风的影响大、设备投资高、耗能和使用成本高等。但是，作为一种节水的灌溉方式，其发展也是十分必要的。

5.4.2　喷灌系统的组成和分类

5.4.2.1　喷灌系统的组成

通常喷灌系统由水源工程、水泵和动力机、输配水管道系统、喷头以及附属设备、附属建筑物组成。

① 水源工程　喷灌系统的水源可以是河流、湖泊、水库、池塘、泉水、井水或渠道水等。喷灌的建设投资较高，设计保证率一般要求不低于 85%，水源应满足喷灌在水量和水质方面的要求。对于轻小型喷灌机组，应设置满足其流动作业要求的配套工程。

② 水泵和动力机　除利用自然水头以外，喷灌系统的工作压力均需由水泵提供，与水泵配套的动力机在有供电的情况下应尽量采用电动机，无电地区只能采用柴油机，轻小型喷灌机组为移动方便通常采用喷灌专用自吸泵并以柴油机、汽油机等带动。在井灌区等建设的小型喷灌工程最好用水泵一次完成提水和加压工作，建设大型喷灌工程时为了降低系统工作压力，通常采用分级加压的方式。喷灌系统实际工作流量变化大时，应对水泵的运行进行调节，通常用增减水泵开启台数或配备压力罐进行水泵工作时间调节等方式。

③ 管道系统　喷灌通常是将灌溉水加压后再进入喷灌管道系统，因此喷灌管道系统应能承受一定的压力并通过一定的流量，通常分为干管和支管两级；对移动或半固定式喷灌系统而言，除干管和支管外，通常还增加移动支管。对固定式喷灌而言，干管起输配水的作用，支管是配水管道，支管上按一定间隔安装竖管和喷头，压力水通过干管、支管、竖管经喷头喷洒到田面上；必要时可增加一级分干管。管道根据敷设状况可分为地埋管道和地面移动管道，地埋管道通常埋于当地冻土层深度以下，地面移动管则按灌水要求沿地面铺设。部分喷灌机组的工作管道往往和行走部分结合为一个整体。

④ 喷头　喷头是喷灌系统的专用设备，形式多种多样，但作用都是将管道内的连续水流喷射到空中，形成众多细小水滴，撒落到地面的一定范围内补充土壤水分。对喷头的基本要求是能够雾化并不造成作物叶面损伤、合理的水量分布使田间灌溉均匀、喷洒水量应适应土壤入渗能力而不产生径流。由于单喷头的喷洒范围很有限，水量分布难以达到均匀，实际应用中经常是多喷头作业，称为喷头组合。作业中喷头边喷边移动时称为行走式喷洒（简称行喷），作业中喷头不移动的称为定点喷洒（简称定喷）。

⑤ 附属设备与附属工程　喷灌工程中还用到一些附属设备和附属工程。如果从河流、湖泊、渠道取水，则应设拦污设施，为了保护喷灌系统安全运行，必要时应设保护设备如进排气阀、调压阀、减压阀、安全阀、泄水阀等。为了监测系统压力、流量状况，通常还需要在系统中增加附属工程，如观察喷灌系统的运行状况，安装在水泵进出管路上应设真空表、压力表以及水表，管道系统上的闸阀，伸缩节，镇墩与支墩，注入农药和肥料的调配和注入设备等。附属设备、附属工程对于保证喷灌系统正常运行，充分发挥效益具有重要的意义，应引起足够的重视。

5.4.2.2　喷灌系统的分类

喷灌系统的形式很多，如按喷灌系统获得压力的方式分类，有机压喷灌系统和自压喷灌系统以及原则上属于机压喷灌系统但又具有自压喷灌特点的扬水自压喷灌系统；如按系统构成的特点分类，又可分为管道式喷灌系统和机组式喷灌系统。

5.4.3　规划设计基本资料

进行喷灌工程的规划设计，需要有灌区的自然条件、作物资料、气象资料、水源资料、电源情况、灌溉条件和社会经济条件等方面的基本资料。这些基本资料是规划设计的基础。只有基本资料可靠的、符合实际，才有可能做出正确的、合理的规划设计，因此，在进行喷灌工程的规划设计之前，必须通过认真的勘测，搜集这些资料。

地形　反映灌区地形、地貌、地面坡度、作物布局及种植方向等的地形图，是进行喷灌系统布置、系统总扬程计算及管道设计所必需的。

土壤　喷灌水经入渗转化为土壤水而被作物所吸收利用，因而在喷灌工程规划设计时，必须掌握灌区土壤特性与地形特征，包括土壤质地、容重、土壤水分常数、土壤允许入渗速度、冻土层深度土壤温度、地形坡度和盐分含量等。以便用来确定作物的灌溉制度和选择喷头。

作物　包括喷灌作物的种类、种植面积、分布位置，生育期、生育阶段及其天数，需水量，主要根系活动层深度，以及当地灌溉试验资料，这些资料是确定灌溉制度和灌溉用水量，进而确定水源工程及整个喷灌工程规模的主要依据。

水源　水源是喷灌系统规划设计的前提条件。以收集的资料作为基础，经过分析计算，取得用作喷灌系统规划设计依据的设计流量和设计水量，经与灌溉用水量

平衡计算，确定灌溉面积以及系统所需扬程，确定是否需要规划蓄、提、引水工程及其规模。当同一水源向几个用水部门供水时，应调查了解各用水部门的用水情况，以确定水源对喷灌系统的供水能力。并且，灌溉水源水质必须满足要求。

气象　包括气温、降水量、蒸发量、湿度、风向、风速、日照时数等气象资料，作为计算作物需水量和制定灌溉制度的依据。由于喷灌的水量分布受风的影响大，因此必须掌握灌溉季节的主风向、最大、最小和常见风速等资料，以便根据风向和风速，合理的选择和布置喷头、喷头组合、管道布置以及估计喷灌系统有效工作时间的依据。

其他条件　合理设计喷灌系统还需要水利工程现状、生产现状、喷灌区农业区划和水利规划、动力和机械设备、材料和设备生产供应情况、生产组织和用水管理等。

社会经济条件　包括灌区的行政区划、人口、劳力数量、人均收入、交通情况，特别是在市（县）、镇的近郊建立喷灌工程时，必须了解该市（县）、镇的建设规划，不应把喷灌工程规划在城镇建设近期发展区域内。

5.4.4　喷灌工程规划设计

在 21 世纪的今天，兴建喷灌工程与兴建其他各类工程一样，要有速度、质量、效益、法规的观念，再不能采取过去那种“边勘测、边设计、边施工”的粗放型做法，而应严格按照工程建设程序，在申请立项、审批、规划，设计等一系列前期工作完成后再付诸工程实施。

5.4.4.1　喷灌工程规划设计的原则、内容与成果要求

（1）喷灌工程规划的原则

① 喷灌工程的规划应以各地的喷灌区划为基础，并与当地的农业区划和水利规划协调一致；②贯彻统筹兼顾的原则；③注重经济效益；④注意节约能源；⑤因地制宜；⑥贯彻谁受益、谁投资的原则。

（2）喷灌工程规划的内容

喷灌工程规划是整个喷灌工程建设的依据，也是进行具体技术设计的前提。它的主要内容见表 5-23。

在设计任务书中应阐明该喷灌工程选定的设计标准、依据的原则、定量计算的计算方法与结果。在进行可行性分析和方案选择时均应进行多方案比较。

（3）喷灌工程规划阶段的成果要求

喷灌工程规划阶段应提交的成果有设计任务书和喷灌工程规划布置图。设计任务书可按下述内容和顺序编制：①喷灌区基本情况；②喷灌工程可行性分析；③喷灌系统类型的选择；④水源分析及水源工程规划；⑤喷灌工程的规划布置；⑥投资概算及效益分析。

表 5-23 喷灌工程设计步骤及内容

项 目	内 容
勘测和收集资料	包括灌区的自然条件、生产条件、社会经济条件等方面的资料；当地的喷灌区划、农业区划、水利规划、乡镇发展远景规划等方面的资料；灌溉试验资料等。通过勘测、调查和试验等手段获得的各种资料和试验结果，做到选用数据真实、准确
可行性分析	根据资料，对在该地兴建喷灌工程的技术可行性和经济合理性作出论证。将采用喷灌与采用其他的灌溉方式进行比较
系统选型	系统类型应根据当地的水源、地形、作物、能源及设备供应、管理体制、经济基础等条件，对可能适用的喷灌系统类型（一般要求 2～3 种）进行技术经济比较，从中择优选定。对于面积较大或地形条件复杂的灌区，亦可分区选用几种不同类型。通常，在灌水次数频繁、地面坡度陡、地形复杂处或对于经济价值高的作物，可采用固定管道式喷灌系统。在地形平坦的大田作物区，可采用半固定管道式、移动管道式或小型机组式喷灌系统。在灌水次数较少情况下，对于适度规模经营的大田作物可采用卷盘式喷灌机。在大中型农场可采用中心支轴式喷灌机和平移式喷灌机。连片集中的牧草地和矮秆作物种植区，可选滚移式喷灌机
水源工程规划	①确定喷灌系统从水源取水的方式和取水的位置。②分析现有水源的流量、水位、水质是否符合该喷灌系统的要求。若不符合时采用哪些工程措施，合理确定蓄水工程的数量、容积、位置等；如果水质不符合要求时，应如何修建沉沙池等水质处理设施
压力分区规划	当喷灌区面积较大或地形复杂、地块分散、水源集中、输水距离较长时，会形成喷灌区各处的压力值相差很大，应对喷灌区进行压力分区规划
工程规划布置	在综合分析水源位置、地块形状、耕作方向、地形、地质、风向以及现有的道路、林带、排水和供水供电系统等因素的基础上，进行喷灌工程规划布置。通常需进行至少两个方案比较，以寻求更佳的布置方案。工程规划布置宜在比例尺不小于 1/5000 的地形图上做，在地形图上绘出喷灌区的边界线、压力分区线，标出水源工程、泵站等主要建筑物以及典型地物的位置，标出喷灌系统骨干管（渠）的位置和走向
投资概算及效益分析	对主要材料和设备的用量、投资造价及工程运行费用做出估算。若面积较大时，可以典型地块为单元进行估算，然后扩大概算出全喷灌区的投资。效益计算的内容有：总投资、年费用、效益计算、亩投资、还本年限、效益费用比和内部回收率

5.4.4.2 喷灌工程的用水分析

喷灌工程的用水量包括两个方面的含义，一个是指用水总量，一个是指用水流量。喷灌工程的用水量主要是农田喷灌的用水量，它是以喷灌区内作物的需水量为基础，再考虑喷灌区内从水源到农田直至被作物吸收利用的全过程中损失的水量。

（1）作物需水量

作物需水量是指作物在正常生长的情况下，供给植株蒸腾和棵间土壤蒸发所需的水量，因此也称为作物腾发量。当土壤供水充足，其含水量在田间持水量的80%～85%以上，作物在较高水平的栽培技术和用水管理条件下能正常生长发育并获得最高产量时，腾发量可达最大值，用式（5-25）计算

$$ET_1 = ET_{max} = K_c \times ET_0 \quad (5\text{-}25)$$

（2）灌溉制度的拟定

为掌握各种情况下所需要的水量，必须拟定合理的喷灌灌溉制度。所谓灌溉制度是指作物播前及全生育期内的灌水次数、灌水日期、灌水定额和灌溉定额。灌水定额是指单位灌溉面积上的一次灌水量。作物在整个生育期要多次灌水。灌溉定额就是作物在全生育期各次灌水量之和。

（3）设计灌水定额和设计灌水周期

作物的灌水定额和灌水周期随着年份和生育阶段不同而有所变化，为了确保喷灌工程的设计标准，应选择符合设计代表年的作物灌水临界期（作物需水强烈、计划湿润层等计算设计灌水定额和设计灌水周期。

① 设计灌水定额的计算

$$m = 1000\gamma_d H\theta_{田}(\theta_{max} - \theta_{min})/\eta \quad (5\text{-}26)$$

式中　m——设计灌水定额，mm；

γ_d——土壤容重，g/cm^3；

H——计划湿润层深度，cm；

θ_{max}、θ_{min}——适宜土壤含水量上、下限，重量百分比；

$\theta_{田}$——田间持水量，重量百分比；

η——喷洒水利用系数。

若用单位面积的用水量表示设计灌水定额，则

$$m_0 = \frac{2}{3}m \quad (5\text{-}27)$$

计划湿润层深度 h，主要取决于作物主要根系活动层的深度，随着作物的生长根系活动层也随之加大。这里说的计划湿润层是指需水关键期作物主要根系活动层的深度。一般大田作物可取 40～60cm，蔬菜 20～30cm，果树 80～100cm。适宜土壤含水量的上限一般取田间持水量的 80%～100%。适宜土壤含水量的下限一般取田间持水量的 55%～70%。

喷洒水利用系数是指净灌水量与喷头喷灌水量的比值，它考虑了由喷头喷洒出来的水因蒸发和飘移而产生的水量损失。在有条件的情况下，宜实测确定，其计算公式为

$$\eta = \frac{\bar{\rho}A}{1000q} \quad (5\text{-}28)$$

式中　$\bar{\rho}$——实测的平均喷灌强度，mm/h；

A——实测的湿润面积，m^2；

q——测试时喷头的平均流量，m^3/h。

无实测资料时，可根据气象条件在下列数值范围内选取：风速低于 3.4m/s 时，η 为 0.8～0.9，风速为 3.4～5.4m/s 时，η 为 0.7～0.8。湿润地区取较大值，

干旱地区取较小值。

② 设计灌水周期的计算　设计灌水周期是指在无雨条件下，某种作物耗水旺盛时期的允许最大灌水间隔时间，可按下式计算：

$$T=\frac{m\eta}{\mathrm{ET_a}} \quad (5\text{-}29)$$

式中　T——设计灌水周期，d；

其他符号意义同前。

目前，大田作物的灌水周期，一般取 7～10 天，蔬菜取 1～2 天。

(4) 按水量平衡原理分析拟定灌溉制度

① 播前灌水定额　为了保证作物种子发芽和出苗，必须在播种前保持土壤有一定的含水量，故常需要播前灌溉。播前灌水定额一般可根据经验选定，如北方小麦播前灌水定额为 300～405m³/hm²；棉花播前灌水定额为 300～450m³/hm²。

② 生育期灌溉制度　以作物计划湿润层为研究对象建立水量平衡方程

$$W_2=W_1+P_0+W_k+W_T+M-\mathrm{ET} \quad (5\text{-}30)$$

式中　W_1、W_2——喷灌时段始末计划湿润层含水量；

P_0——时段内保持在计划湿润层内的有效降水量；

W_k——时段内地下水的补给量；

W_T——时段内由于计划湿润层增大而增加的水量；

M——时段内的喷灌水量；ET 为时段内作物的需水量。

一般情况下，W_2、W_1 可用适宜土壤含水量允许的上、下限来确定；P_0 可用时段内的降水量 P 与降水利用系数 σ 的乘积来确定，可参考表 5-24 选用；W_k 是指地下水借土壤毛细管作用上升至计划湿润层内的水量，当地下水埋深大于 3.5m 时，该值可忽略不计；若时段内计划湿润层未增加，W_T 也视为零。于是，只要知道了时段内作物的需水量，即可计算该时段内应喷灌的水量，灌水日期也可确定下来。

表 5-24　日降水量与降水利用系数关系

日降水量/(mm/d)	<5	5～30	30～50	50～100	>100
σ	0	0.8	0.6	0.3	0.15

③ 按作物需水量与作物生长期内的有效降水量差值拟定灌溉制度　华北地区地下水位一般较深，生育期内作物自土中获得的水量主要来自灌溉和降水，故灌溉定额可视为作物全生育期的需水量与有效降水量之差。

(5) 喷灌用水量和用水流量的计算

① 喷灌用水量计算　当灌区作物种类较多时，可采用综合灌水定额法推求喷灌用水过程及用水量，对于单一作物种植情况，可按一种作物计算。综合灌水定额可按下式计算：

$$m_c = a_1 m_1 + a_2 m_2 + a_3 m_3 + \cdots \tag{5-31}$$

式中　m_c——某时段内喷灌区综合灌水定额，m^3/hm^2；

m_1、m_2、m_3——各种作物在该时段内的灌水定额，m^3/hm^2；

a_1、a_2、a_3——各种作物喷灌面积占全喷灌区面积的比值。

用某时段内喷灌区的综合灌水定额 N_c、喷灌区面积 A 及系数 η_c 求出该时段内的毛喷灌用水量 $W_m = m_c A/\eta_c$，然后将全年各时段内的毛灌水量相加求和，即可得出该喷灌区全年用水量。

② 喷灌用水流量的计算　喷灌区内种植多种作物且不同作物的灌水时间有可能重合时，一般应通过绘制灌水率图来推求喷灌用水流量和流量过程，对单一作物种植情况计算方法类似。单位灌溉面积上净灌溉用水流量称为灌水率。某种作物某次灌水率按下式计算

$$q = \frac{am}{3.6Tt} \tag{5-32}$$

式中　q——灌水率，L/（s·hm²）。

按上式计算出设计代表年的各种作物各次灌水，再按其灌水时间依次绘于一张灌水率图。灌水率图是一幅柱状图，其横坐标表示灌水的月份和时段，纵坐标表示灌水率，各种作物在各时段的灌水率用不同标识的柱表示在图上。初步绘制的灌水率图应作必要修正，使其变化较为平稳和连续。修正时，要以不影响作物需水要求为原则，尽量保持主要作物关键用水期的各次灌水率不动，灌水时间前后移动不应超过 3 天，且尽量向前移，为了保证水泵在高效区运行，灌水率的最大值和最小值应尽量接近。

灌水率图确定之后，喷灌区的用水流量一般按最大灌水率计算，当最大灌水率延续时间很短时也可用次大值计算，最终用于计算的灌水率称为设计灌水率。喷灌区的喷灌用水流量用下式计算：

$$Q = \frac{qA}{\eta_c} \tag{5-33}$$

5.4.4.3　喷灌水源分析及水源工程规划

喷灌工程的水源与一般农田灌溉工程的水源基本上是相同的，只是由于喷灌工程的设计标准较高，对水源的要求比较严格，因此，在进行喷灌工程规划时，必须对水源的来水情况了如指掌，并按照喷灌工程的用水情况做好水源工程的规划。

（1）水源来水量分析

喷灌工程由已建成的水利工程供水时，应掌握在设计代表年的水文、气象条件下，渠道的来水量和来水量过程；喷灌工程直接从河中取水时，应分析该河流设计代表年的年径流量和月（旬）径流量；喷灌工程新建蓄水工程拦截当地地面径流作为水源时，应利用当地的水文手册根据设计代表年的降水量及降水过程、径流系数、单位面积的产水量、集水面积等资料，或参考与当地条件相似的邻近地区利用

地面径流的蓄水工程在设计代表年的运行资料，进行水源来水量分析；对于机井灌区，若井已经建成，则应掌握该井在设计代表年的出水量、最大降深、动水位、周围井的分布情况、同时抽水时相互干扰的情况、目前使用的井泵规格型号等，特别是应该掌握随着地下水超采，地下水位逐年降低的情况。若需要新打井，应掌握当地的水文地质资料，如含水层的埋藏深度，含水层的岩性、厚度、层次结构、出水率、咸淡水分层和水质条件等，以及地下水储量及开采条件，以便掌握成井后井的出水量和合理地确定井距。

（2）水量平衡计算

在确定了喷灌区的用水量和用水流量，掌握了喷灌工程水源的来水量和来水流量之后，应对用水和来水进行水量平衡计算。通常，在水量平衡计算中，可能出现三种情况：①当水源来水量及其在时间上的分配都能达到或超过喷灌用水量和用水流量时，说明天然来水能够满足喷灌任何时候的用水要求，无需再修建蓄水工程；②来水量等于或大于喷灌用水量，但其在时间分配上与用水不相适应，这时既具备了调蓄的条件，又存在调蓄的必要，故应建一定规模的蓄水工程调蓄水量，改变天然的来水过程以适应喷灌用水要求；③水源来水量小于喷灌用水量，失去了调蓄的条件，必须另辟水源，增加来水量，使总来水量等于或大于喷灌用水量后再考虑用水调节的问题，否则就应适当地减小喷灌面积。

（3）蓄水工程容积计算

蓄水工程的容积是根据来水和用水的平衡关系来确定的。在掌握水源来水流量的情况下，可通过调节计算确定蓄水工程容积。本着既保证喷灌用水要求又尽量节省工程量的原则，根据水源来水流量与喷灌用水流量的对比关系，调节的周期可长可短，常见的是短时间调节，即日调节和多日调节。

① 日调节　当水源的最小日来水量能满足喷灌最大日用水量，而来水流量小于用水流量时，可按日调节确定蓄水容积。

$$V=K(Q_{用}-Q_{来})t \tag{5-34}$$

式中　V——蓄水容积，m^3，

$Q_{用}$——作物需水临界期用水流量，m^3/h；

$Q_{来}$——作物需水临界期来水最小流量，m^3/h；

t——作物需水临界期日喷灌时间，h；

K——安全系数，考虑蓄水时因蒸发和渗漏的损失，取 1.1～1.2。

② 多日调节　当一日的喷灌用水量超过了水源昼夜来水量，日调节已不能满足时，可考虑利用喷灌间隔时间蓄水，进行多日调节，下面举例说明通过多日调节计算确定蓄水容积。

例：有一喷灌工程面积为 120 亩，设计灌水定额为 $20m^3/hm^2$，若一次灌水延续时间为 7 天，每天净喷灌 10h，两次灌水间允许有不超过 10 天的间隔时间，设计代表年作物灌水临界期水源有稳定流量 $7m^3/h$，若取输水系统水的利用系数为

0.95，试确定蓄水池容积。

轮灌周期内水源的来水量为：　$7\times24\times17=2856$（m^3）

喷灌一次延续灌水 7 天的用水量为：　$(20\times120)/0.95=2526$（m^3）

显然，来水量大于用水量，可以在一个轮灌期（17 天）内进行多日调节。

喷灌延续灌水 7 天中的来水量为：　$7\times24\times7=1176$（m^3）

故蓄水池的容积应为：　$V=1.1\times(2526-1176)=1485\approx1500$（$m^3$）

（4）蓄水工程的选址及其结构特点

蓄水工程的地址一般选在地质条件较好，如不漏水的土层或较完整的岩石基础地带且靠近喷灌区的位置，应经过对建池费用、运行费用、能源保证情况等综合分析比较后确定。

设计中除包含具有一定容积、进行蓄水和调节水量的蓄水池外，还需设置量水、净水（如沉沙池）、安全保护设施（如溢洪道）等。蓄水池的形状可为圆形、方形、长方形等，一般，在条件允许的情况下尽可能采用圆形。蓄水池的池墙可用砖、条石或块石砌筑，并要有适当的厚度，以保证坚实稳固又不浪费材料，池底必须做好防渗处理，对土质池底，若为黏性土，可就地夯实，若土质不好，应填一层厚 30～50cm 的黏土或黏壤土掺石灰，分层夯实，当水池不太大时，也可用片石、砖勾缝衬砌或用厚 10～15cm 的混凝土抹底。对岩石池底，应处理裂缝。

5.5 微灌技术

千百年来人们就已知道，通过灌溉可以使庄稼增产。但是，过量灌溉的后果已经为我们带来了沉痛的教训，由于次生盐碱化，大面积沃土良田被迫弃耕。为了压盐碱，有些灌区采取大水灌大水排的办法以保证作物的生长，造成了水资源的浪费。近年来的许多研究表明，盲目过量灌溉对作物也有不利的影响。

科学的灌溉知识告诉人们，灌溉的目的是“浇作物”，而不是“浇地”，而浇作物又是通过“地”——土壤来实现的。因此深入掌握土壤、水与作物之间的关系，充分利用土壤中水的储存和运动规律，以最适宜的水分供应保证作物正常生长的需要，既是现代节水灌溉技术的一个很重要的内容，也是指导正确灌溉实践的基础。

5.5.1 微灌技术及特点

5.5.1.1 微灌技术分类

目前，生产实际中应用的微灌技术主要有微喷灌、滴灌、渗灌、雾喷灌溉、脉冲灌溉、微喷带灌水和小管出流灌水等。

5.5.1.2 微灌技术及特点

微灌技术具有以下特点：①节约用水，相对于地面灌溉而言，灌溉水的利用效率高；②系统组合性能强，使用方便；③节省能源，相对于喷灌而言，大大减少了

系统的供水量和扬程，节省能源的作用十分明显；④受风的影响小于喷灌系统；⑤有助于降低系统投资；⑥有助于开发利用盐碱土壤；⑦适应于山丘坡地灌溉；⑧可用于施肥等；⑨节约劳力，容易实现自动化；⑩可实现定额灌溉。

微灌的局限性主要表现在：①对灌溉水要求进行一定的处理；②田间若杂草过多、过高，会影响树下微喷头的喷洒质量；③对管理的要求较高；④相对于地面灌溉而言，投资较高。

5.5.1.3 微灌系统组成

微灌系统主要由首部枢纽、管网系统、控制设备、保护设备、田间灌水器、附属建筑物及构筑物等六部分组成。

5.5.2 微灌系统设计

微灌系统设计时，应首先根据作物和使用者要求选择灌水器，再进行系统布置。微灌系统设计的工作内容可分为：

资料收集；水源分析；设计参数的选择；灌水器的选择；灌水器的布置；灌水小区设计；轮灌组划分与最不利轮灌组的选择；确定支毛管管径；确定干管直径；首部枢纽设计，确定系统工作压力，水泵选型，系统校核与压力均衡；绘制系统布置图、结构及安装图；材料单和预算；施工注意事项；运行管理注意事项。

5.5.2.1 微灌系统设计

（1）灌溉制度设计

主要包括：①设计净灌水定额计算；②设计灌水周期的确定；③一次灌水延续时间的确定；④灌水次数与灌溉定额。

使用微灌技术，作物全生育期（或全年）的灌水次数比传统的地面灌溉多。根据我国使用的经验，北方果树通常一年灌水 15～30 次；在水源不足的山区也可能一年只灌 3～5 次，灌水总量为生育期或一年内（对多年生作物）各次灌水量的总和。

（2）系统工作制度的确定

微灌系统的工作制度通常分为全系统续灌和分组轮灌两种情况。不同的工作制度要求的流量不同，因而工程费用也不同。在确定工作制度时，应根据作物种类，水源条件和经济状况等因素作出合理选择。包括全系统续灌和分组轮灌。

5.5.2.2 系统流量计算

主要完成各级管道流量设计，主要包括：①毛管流量计算；②支管流量计算；③干管流量推算，续灌情况下，任一干管段的流量等于该段干管以下支管流量之和；轮灌情况下，任一干管段的流量等于通过该管段的各轮灌组中最大流量。

5.5.2.3 管道水力计算

管道水力计算是压力管网设计非常重要的内容，在系统布置完成之后，需要确定干、支管和毛管管径，均衡各控制点压力以及计算首部加压系统的扬程。具体有

关水力学方面的知识请参阅有关书籍。本处只对有关微灌系统常用的有压管道水力计算进行介绍。

管道水力计算的主要内容：①计算各级管道的沿程水头损失；②确定各级管道的直径；③计算各毛管入口工作压力；④计算各灌溉小区入口工作压力；⑤计算首部水泵所需扬程。

5.5.2.4　支、毛管设计

毛管设计的内容是在满足灌水均匀度要求下，确定毛管长度、毛管进口的压力和流量。在平整的地块上，一般最经济的布置是在支管的两侧双向布置毛管。毛管入口处的压力相同，毛管长度也相同。

在沿毛管方向有坡度的地块上，支管布置应向上坡移动，使逆坡毛管的长度适当减小，而顺坡毛管长度适当加大。这样地形变化加上水头损失使得整条毛管出流均匀。

支管的间距是由地形条件、毛管和滴头的水力特性决定的。必须指出的是调节器的局部水头损失不可忽视，在某种情况下，损失可能达到好几米。相关数据由制造商提供。

（1）支管设计

微灌系统支管是指连接干管与毛管的管道，它从干管取水分配到毛管中。支管同毛管一样也是多孔出流管道，与毛管不同的是其流量要大得多，因而支管一般是逐段变细的，这主要是为了在一定压力差范围内使投资更小。

支管设计包括确定管径以及支管入口压力。当沿支管地形坡度小于 3%时，通常情况下最经济的方式是支管沿干管双向布置。当沿支管地形坡度大于 3%时，干管应向上坡方向移动，使逆坡支管长度减小，而顺坡的支管长度增加。

为了降低投资，支管一般设计成由 2～4 种管径组成，为了保证支管的冲洗，最小管径不应小于最大管径的一半。通常支管内流速应限制在 2m/s 之内。

（2）毛管设计

微灌系统毛管是指安装有灌水器的管道，毛管从支管取水，然后通过其上的灌水器均匀地分配到作物根部。一般采用耐老化低密度或中密度聚乙烯制造，毛管直径一般为 10～20mm，有时也用到 25mm。由于滴灌工程毛管数量相对较大，因此一般选用较小直径的毛管，最常用的毛管直径为 10～16mm。毛管一般选用同一直径，中间不变径。

毛管设计是在确定了灌水器类型、流量和布置间距后进行的，通常只有选用单个滴头时，毛管设计才是必需的，对于一体化滴灌管，可依靠厂家提供有关毛管的参数。毛管设计的任务是确定毛管直径和在该地形条件下允许铺设最大长度。对于这个问题，由于选用不同类型的灌水器，其设计方法也是不同的。可参照表 5-25 对应选择，可由图 5-22 的曲线确定水头损失。

（3）干管及首部枢纽设计

表 5-25 内镶式滴头（2.8L/h）入口压力为 10m 水柱时平地最大铺设长度

流量偏差率/%	滴头间距/m							
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.75	1.00	1.25	1.50
±5.0	71	87	101	114	132	160	185	208
±7.5	80	97	113	127	148	179	207	232
±10	89	108	126	142	165	200	231	258

注：滴灌管直径为 16mm。

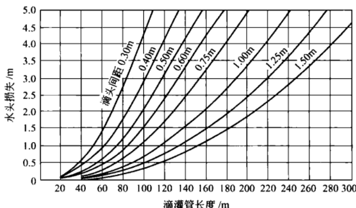


图 5-22 一种内镶式滴灌管的水头损失曲线

① 干管设计 干管是指从水源向田间支毛管输送灌溉水的管道。干管的管径一般较大，灌溉地块较大时，还可分为总干管和各级分干管。干管设计的主要任务是根据轮灌组确定的系统流量选择适当的管材和管道直径。

微灌系统干管一般都选用塑料管材，可选用的管材有聚氯乙烯（PVC）管、聚乙烯（PE）管和聚丙烯（PP）管。

根据系统压力，选用不同压力等级的塑料管。塑料管道的压力等级分为 0.25MPa，0.40MPa，0.63MPa，1.00MPa 和 1.25MPa。不同材质的塑料管的抗拉强度不同，因此同一压力等级，不同材质塑料管的壁厚也不相同。对于较大的灌溉工程或地形变化较大的山丘区灌溉工程，由于系统压力变化较大，应根据不同的压力分区选用不同压力等级的管材。

对于压力不大于 0.63MPa 的管道，以上四种塑料管均可使用，压力大于 0.63MPa 的管道，推荐使用聚氯乙烯（PVC）管材。

② 首部枢纽设计 集中安装于系统进口部位的加压、调节、控制、净化、施肥（药）、保护及量测等设备的集成称为首部枢纽。首部枢纽的设计就是正确选择和合理配置有关设备和设施，以保证微灌系统实现设计目标。首部枢纽对微灌系统运行的可靠性和经济性起着重要作用，因此，在设计时应给予高度重视。

在选择设备时，其设备容量必须满足系统过水能力，使水流经过各设备时的水头损失比较小。在布置上必须把易锈金属件和肥料（农药）注入器放在过滤装置上

游，以确保进入管网的水质满足微灌要求。

① 水泵 离心泵和潜水泵是微灌系统应用最普遍的泵型。

② 过滤器 选型时要注意工作点位于高效区。选择过滤设备主要考虑水质和经济两个因素。筛网过滤器是最普遍使用的过滤器，但含有机污物较多的水源使用砂过滤器能得到更好的过滤效果，含砂量大的水源可采用旋流式水砂分离器，且必须与筛网过滤器配合使用。筛网的网孔尺寸或砂过滤器的滤砂应满足灌水器对水质过滤的要求。过滤器设计水头损失一般为 3～5m。

③ 水表 水表的选择要考虑水头损失值在可接受的范围内，并配置于肥料注入口的上游，防止肥料对水表的腐蚀。

④ 压力表 选择测量范围比系统实际水头略大的压力表，以提高测量精度，最好在过滤器的前后均设置压力表，以便根据压差大小确定清洗时机。

⑤ 进排气阀与排水阀 进排气阀一般设置在微灌系统管网的高处或局部高处，在首部枢纽应在过滤器顶部和下游管上各设一个。其作用为在系统开启充水时排除空气，系统关闭时向管网补气，以防止负压产生。系统运行时排除水中夹带的空气，以免形成气阻。进排气阀的选用，目前可按“四比一”法进行，即进排气阀全开直径不小于管道内径的 1/4。如 100mm 内径的管道上应安装内径为 25mm 的进排气阀。

另外在干、支管末端和管道最低位置宜安装排水阀，以便冲洗管道和排净管内积水。

(4) 蓄水池设计

蓄水池除调蓄水量外，也可起到沉沙、去铁的作用。蓄水池的容积见规划部分水利计算。蓄水池的出水口（或水泵进水口）应设在高出池底 0.3～0.4m 处，既避免带走沉淀物，又充分利用水池容积；在有条件的地方，尽可能安设冲洗孔；温暖地区的蓄水池很容易滋生水草和藻类，对微灌系统工作影响较大，目前最佳的办法是加盖避光。

当微灌系统既需沉淀池又需蓄水池时，设计时首先考虑二者合一的方案，根据工作条件尽可能减小容积、降低投资。

表 5-26 各种不同管件处的推力（PVC，每 10m 水） 单位：N

管径/mm	管件			管径/mm	管件		
	90°弯头	45°弯头	三通堵头闸阀		90°弯头	45°弯头	三通堵头闸阀
25	70	40	50	63	500	270	350
32	120	60	80	75	700	400	500
40	180	100	130	90	1150	600	800
50	280	150	200	110	1650	880	1150

(5) 镇墩设计

镇墩是指用混凝土、浆砌石等砌体定位管道，借以承受管中由于水流方向改变等原因引起的推力，以及直管中由于自重和温度变形产生的推、拉力。三通、弯头、变径接头、堵头、阀门等管件处也需要设置镇墩。镇墩设置要考虑所受力的大小和方向，并使之安全地传递给地基。镇墩的推力和传压面面积可由表 5-26 与表 5-27 查出有关数据，经计算确定。

表 5-27 不同土壤安全承载力

土壤类别	安全承载力 /kPa	土壤类别	安全承载力 /kPa
软黏土	50	混合着黏土的砂砾石	200
砂土	100	砾页岩	500
砂砾石	150		

微灌系统的干、支管道一般均埋入地下，此时传力面积应正交于推力方向。对于设置于地表的管道，其推力尚要叠加最不利工作条件下的温度变形力。陡坡管段还要考虑管道自重、管内水重的分力，由稳定计算确定镇墩大小。

5.5.3 设计实例

5.5.3.1 果树滴灌设计实例

就典型的落叶果树——苹果进行滴灌设计，基本资料参见表 5-28。地块见图 5-23。为了描述滴灌系统的设计过程，本例按下列步骤设计：①选择滴头并确定滴头间距 S_e 和毛管间距 s_1，一次灌水延续时间 T_a，轮灌组数 N，灌水器平均流量 Q_o 和工作水头 h_a；②确定允许水头差以满足灌水均匀度；③确定支管位置和毛管设计；④设计支管和干管。

表 5-28 滴管系统设计资料表

项目名称	参 数	项目名称	参 数
土地和水源		5. 作物	苹果
1. 地块号	#1	6. 作物株行距 $S_p \times S_r$	3m×3m
2. 地块面积	46.8hm²	7. 作物根系深度 Z	1.5m
3. 年有效降雨 R_e	100mm	8. 作物遮荫率 P_S	80%
4. 灌溉季节前土壤可利用水量 W_S	0	9. 设计日耗水强度 ET_c	4mm/d
5. 供水能力	180m³/h	10. 淋洗水量比 L_{Rt}	0
6. 水的导电率 E_{cw}	1.4mS/cm	灌水率	
7. 水质分类	好	1. 选型式	管上式补偿
土壤和作物		2. 每个滴头出水口数	1
1. 土壤结构	壤土	3. 工作压力	10～40m
2. 田间有效持水量	10%	4. 流量 q_0	3.75L/h
3. 土层深度	3m	5. 流态指数	0
4. 允许土壤水消耗占田间持水量百分数	30%	6. 制造偏差系数 C_v	0.05

（1）设计计算

在进行管网的水力设计之前，需要首先确定滴头间距 S_e，滴头平均流量 q_a，滴头工作水头 h_a，允许水头差 ΔH_s。本例中当滴头流量为 3.75L/h 时，对中壤土每个滴头湿润面积为 1.0m×3m 果树株行距为 3m×3m，选择 0.8m。滴头间距为 1.25m。一行果树布置一条毛管。

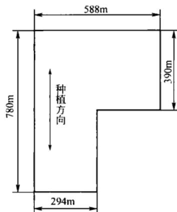


图 5-23　果树滴灌设计地块

湿润比 p：已知 $S_e=1.25$m，$S_e'=1.0$m，$W=0.8$m，$S_p=3$m，$S_r=3$m，$S_e>S_e'$，

$$p=\frac{2.4\times1.0\times0.8}{3\times3}\times100\%=21.3\%$$

在公式中选用 S_e'，$N_p=S_p/S_e=2.4$

设计灌水定额 m：　其中 $\beta=30\%$，$F_d-W_o=10\%$，$Z=1.5$m，$P_w=21.3\%$，

$$m=30\times10\times1.5\times21.3/1000=9.59\ (\text{mm})$$

设计日耗水量 ET_c：　设计日耗水量 $Et_c=4$mm/d

灌水周期 T：$T=m/ET_c=9.59/4=2.4$（天），设计灌水周期 T 取 2 天。因为实际管理时灌溉周期并不影响整个系统的水力设计。$ET_c=4$mm/d，$T=1$ 天，假设每天灌溉　$m=4\times1=4$（mm）

灌溉均匀度 E_u：在实际设计时，在相对较平坦的地形上，滴灌系统设计灌溉均匀度一般取 90%。

淋洗水量比 L_{Rt}：已知 $E_{cw}=1.4$mS/cm，$E_{ce}=1.77$mS/cm，以及最大 $E_{ce}=8$mS/cm

$$L_{Rt}=\frac{E_{cw}}{2E_{ce}\max}=1.4/(2\times8)=0.087$$

日毛灌水量 I：已知 $T=1.00$，$L_{Rt}=0.087$，$I=4$mm/d，$E_u=90\%$，灌溉水量的损失大于淋洗所需的水量 $I-E_u=0.1>L_{Rt}$，当 $L_{Rt}\leqslant0.1$ 时，在需水高峰期，不需要淋洗，因而 $I=4\times1.0/0.90=4.4$（mm）。

每棵树日毛耗水量 F：已知 $I=4.4$mm，$S_p=3$m，$S=3$m，$T=1$ 天

日毛耗水量 $F=4.4\times3\times3=39.6$（L/d）

一次灌水延续时间 t：已知 $F=39.6$L/d，$N_p=2.4$，$q=3.75$L/h

$$t=39.6/(2.4\times3.75)=4.4(\text{h})$$

灌水器平均流量：由于采用补偿式滴头，灌水器平均流量为 3.75L/h。允许水头变化（灌水小区）采用补偿式滴头，工作水头为 10～40m。

滴灌系统设计结果见表 5-29。

表 5-29 滴灌系统设计结果表

设计参数名称	量值	设计参数名称	量值
Ⅰ 初步设计		Ⅱ 设计结果	
1. 设计者		1. 日灌水持续时间，t	4.4h
2. 滴头间距 $S_c \times S_l$	1.25m×3m	2. 设计灌水周期，T	1天
3. 每棵果树滴头数，e'	2.4	3. 实际灌水量 I	4.4mm
4. 湿润比，p_w	21.3%	4. 滴头平均流量，q_a	3.75L/h
5. 管水定额最大值，I_{max}	9.59mm	5. 滴头工作压力	20m
6. 设计日耗水量，ET_c	4mm/d	6. 允许压力差	4m
7. 最大设计灌水周期，T_m	2.24 天	7. 滴头布置，$S_E \times S_L$	1.25m×3m
8. 设计灌水周期，T	1天	8. 湿润比	21.3%
9. 灌水均匀度，E_u	90%	9. 轮灌组数	3
10. 一次灌水延续时间，t	4.4h	10. 系统总流量	117m³/h
		11. 灌水效率	90%

（2）系统布置和毛管设计

从绘出的地块形状图来看，毛管沿果树种植方向布置，每行树布置一条毛管，支管沿毛管的垂直方向布置。在地块宽向的1/4处和3/4处各布置一条干管，如图5-24所示。支管的间距是由所选毛管的铺设长度决定的，即为毛管最大铺设长度的2倍。滴头流量为3.75L/h，滴头间距为1.25m，平地上毛管最大允许铺设长度：入口压力0.1～0.3MPa，16mm毛管允许铺设125～281m；12mm毛管允许铺设52～117m。但考虑微地形的变化以及其他因素的影响，设计时采用的最大铺设长度一般为制造厂商提供数据的80%～90%。从地形图情况看，地块长780m，如采用16mm的毛管，可采用入口压力为0.2MPa，毛管实际铺设长度为195m。如采用12mm的毛管，可采用毛管入口压力为0.22MPa，毛管实际铺设长度为97.5m。

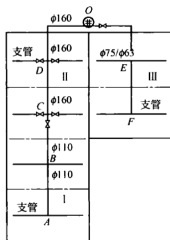


图 5-24 干支管布置（方案一）

下面就这两种布置形式进行比较。

① 方案一　采用外径 12mm 的毛管，滴头间距为 25m，毛管铺设长度为 97.5m。田间布置方式见图 5-24。支管间距为 2 倍的毛管长度，即 195m。

a. 支管设计

Ⅰ. 支管流量推算。各区面积相同，因而每条毛管流量为 $q_{支}=97.5/13.75=292.5$（L/h），每条支管上毛管数 $N_{支}=98$ 条，因而 $Q_{支}=98\times292.5=286659$（L/h）。

Ⅱ. 支管管径选择及小区入口压力确定。支管为多口管道，每个出流口为两条毛管，共有 49 个出流口，出流口间距 $S=3.0$m。由于支管长度为 145.5m，将支管直径选择两个规格较合适，初步选 0.4MPa 级的 $\phi63$ 的 PVC 管，$\phi75$ 管长为 45.5m，$\phi63$ 管长为 100m，水头损失计算如下。

$\phi75$PVC 管：$Q=28.76\text{m}^3/\text{h}$，$L=45.5$m。先计算 $\phi76$PVC，长度为 145.5m，出口数为 49 时的水头损失，查诺莫图可知 $h'_f=5.2\text{m}/100\times145.5=7.6$m，多口系数为 $F=0.365$。再计算 $\phi75$PVC，长度为 100m，出口数为 33 时的水头损失

$$Q=292.5\text{m}^3/\text{h}\times2\times33/1000=19.31\text{m}^3/\text{h}$$

$$h'_f=2.8\text{m}/100\times100=2.8\text{m}$$

多口系数为 $F=0.376$

水头损失为：

$$h_f=0.365\times7.6\text{m}-0.376\times2.8\text{m}=1.72\text{m}$$

$\phi63$PVC 管：$Q=19.31\text{m}^3/\text{h}$，长度为 100m，出口数 $N=33$，$h'_f=4.28\text{m}/100\times100=4.28$m

多口系数 $F=0.376$

$$h_f=0.376\times4.28\text{m}=1.6\text{m}$$

支管总水头损失为局部水头损失按沿程损失的 10％估计。

$$h_{f支}=1.1\times(1.72+1.6)\text{m}=3.65\text{m}$$

支管入口压力：

$$H_{支}=H_{毛}+h_{f支}=22\text{m}+3.65\text{m}=25.65\text{m}$$

b. 干管设计。根据轮灌组的划分，可以清晰地看出，轮灌组Ⅰ由于距水源较远，是最不利工作组。依据管道布置，初选干管直径为 $\phi160$mm 和 $\phi110$mm（0.63MPa 级）PVC 管，即 OC 段为 $\phi160$mm，长度 546m，CB 段为 $\phi160$mm，长度为 195m，BA 段为 $\phi110$mmPVC，长度为 195m。

流量：AB 段：$Q_A=2\times28.7\text{m}^3/\text{h}=57.4\text{m}^3/\text{h}$

BC 段：$Q_B=2\times Q_A=114.8\text{m}^3/\text{h}$

OC 段：$Q_C=Q_B=114.8\text{m}^3/\text{h}$

水头损失：AB 段：$h_{fA}=3.2\text{m}\times195/100=6.24$m

BC 段：$h_{fB}=1.65\text{m}\times195/100=3.22$m

OC 段：$h_{fC}=1.65\text{m}\times546/100=9.0\text{m}$

干管总水头损失（局部水头损失占沿程损失的5%计）

OA 段 $h_{f干}=1.05\times(6.24+3.22+9.0)\text{m}=19.38\text{m}$

干管入口处压力水头：$H_{f干}=H_{f支}+h_{f干}=23.64\text{m}+19.38\text{m}=43.02\text{m}$

c. 首部枢纽设计

过滤器的选择：本工程水源为井水，因而选择旋流式水沙分离与筛网过滤器的组合。选用北京通捷机电设备有限公司生产的过滤器，规格为4in，数量为2套，每套过流量为60m³/h，查性能曲线可知，水头损失为7m。

施肥系统：选用电动柱塞泵，流量为100L/h。

首部枢纽附件：安全阀1只，止回阀1只，闸阀1只。

d. 水泵选型。干管入口处的所需压力：$H_{干}=43.02\text{m}$

水源动水位降深：$\Delta Z=20\text{m}$ （相对于干管入口处高程）

首部有二级过滤器和止回阀，取首部局部水头损失：$h_{f首}=10\text{m}$，井管长30m，钢管，内径为95mm，水头损失约为5m。

系统总扬程：$H=43.02+20+10+5=78.02$ (m)

选用井用潜水泵，250QJ125-80/5

$$Q=125\text{m}^3/\text{h}, H=80\text{m}, N=45\text{kW}$$

e. 系统与压力均衡校核。根据轮灌组的划分，对各支管入口压力进行校核。地形为平地，不考虑地形高差引起的水头变化。其计算方法与计算干管时的方法相同，此处不再赘述，只给出如下计算结果。

轮灌组Ⅰ： 节点 A 处的压力水头为28m

节点 B 处的压力水头为34.3m

轮灌组Ⅱ： 节点 C 处的压力水头为41.2m

节点 D 处的压力水头为42.3m

轮灌组Ⅲ： 节点 E 处的压力水头为42.0m

节点 F 处的压力水头为35.4m

从以上计算可以看出，各节点处的水头均大于支管入口需求，设计满足要求。管系结构图（图5-25），材料单及预算结果见表5-30。

② 方案二 采用16mm的毛管，滴头间距为1.25m，毛管铺设长度为195m。田间布置方式见图5-26。支管间距为2倍的毛管长度，即390m。具体设计步骤同方案一。

方案二的工程投资预算结果见表5-30。

③ 方案比较 本设计的两个方案由于只选择了不同的毛管直径，则田间布置和干支管直径略有不同。

毛管投资比较：方案一为117000.00元；

方案二为152100.00元；差价为35100.00元。

表 5-30 预算结果表

名 称		规 格	数量	单价/元	复价/元
(1)首部枢纽	水泵	250QJ125-80/5	1台	25000.00	25000.00
	泵管	Dg100	10m×3m	50.00	1500.00
	双盘弯头	Dg100	1只	100.00	100.00
	闸阀	Dg100	1只	300.00	300.00
	止回阀	Dg100	1只	300.00	300.00
	安全阀		1只	450.00	450.00
	分水管	Dg100	1套	300.00	300.00
	离心过滤器站	Dg100	2套	7200.00	14400.00
	集水管	Dg100	1套	300.00	300.00
	入地管	Dg100×ϕ160	1只	400.00	400.00
	电动注塞泵闸阀	Dg20	1只	11.00	11.00
					小计 43061.0
(2)干管系统	PVC管	160mm	800m	47.45	37960.00
	PVC管	110mm	600m	22.25	13650.00
	弯头	160mm	1只	150.00	150.00
	单盘三通	160×160×160盘	1只	200.00	200.00
	闸阀	160mm	1只	400.00	400.00
	单盘短管	160mm	1只	150.00	150.00
	变径四通	160×75×75×160	1只	2500.00	250.00
	变径三通	160×75×75	2只	150.00	300.00
	双盘变径四通	160×75法×75法×160	1只	300.00	300.00
	闸阀	Dg100	1只	300.00	300.00
	变径四通	Dg100×75×75×100	1只	200.00	200.00
	变径三通	Dg100×75×75	1只	150.00	150.00
					小计 54010.00
(3)田间系统	PVC管	75mm	1200m	11.05	13260.00
	PVC管	63mm	1200m	9.23	11076.00
	变径	75×63	12只	75.00	900.00
	闸阀	75mm	4只	100.00	400.00
	单盘短管	75mm	4只	100.00	400.00
	堵头	C63	12只	18.70	224.40
	滴灌管	ϕ20×3.75L/h×1.25m	117000m	1.00	117000.00
	旁通	12mm	1400只	0.70	980.00
	胶圈	12mm	1400只	0.50	700.00
	堵头	12mm	1400只	0.20	280.00
	直通	12mm	2000只	0.50	1000.00
	PE管	12mm	1400m	0.60	840.00
	滴头	3.75L/h	10000只	0.50	5000.00
					小计 152060.40

续表

名称		规格	数量	单价/元	复价/元
(4)施工工具及配件	手摇钻		2只	40.00	80.00
	手锯		2把	40.00	80.00
	PVC胶		10瓶	30.00	300.00
	砂纸		20张	1.00	20.00
	扳手	10in	4把	30.00	120.00
					小计 600.00
(5)基建费用	泵房	3m×5m	1间		15000.00
	镇墩		6只	100.00	600.00
	管沟	0.6m×0.5m	3800m	3.00	11400.00
	设备安装				10000.00
					小计 37000.00
(6)运输费用	方案一:预算结果 材料费:250831.40元;基建费:37000.00元;配件费:600.00元 不可预见费:(按材料费的10%计)25000.00元 每亩材料费:(按520×亩计)482.00元/亩 案二:预算结果 材料费:282961.00元;基建费:37000.00元;配件费:600.00元 不可预见费:(按材料费的10%计)25000.00元 每亩材料费:(按520×亩计)544元/亩				

干支管投资比较：方案一为78346.00元；

方案二为73170.00元；差价为5176.00元。

可以看出，尽管方案二支管布置间距较大，干支管长度减小，但由于使用的管径加大，投资并未下降很多。在滴灌系统中，由于毛管数量很大。若毛管单价略有提高，就会引起系统投资迅速上升。

方案一与方案二差价为29924.00元，差价为42.6元/亩。因此从各方面因素考虑，方案一是较好的选择。

5.5.3.2 保护地蔬菜滴灌设计实例

下面就100m×7m阳光温室和10m×70m温室大棚的滴灌做一典型设计。选用北京绿源塑料联合公司生产的大棚专用滴灌材料。

(1) 日光温室

滴灌管布置间距为1m、滴头间距0.3m、支管水头损失为3m，毛管长度为7m、支管外径为32mm时，允许长度为55m，因而对于本设计的情况，将首部置于地块中间，可选用32mm的支管。设计结果见表5-31。

(2) 温室大棚

滴灌管布置间距为1m，滴头间距为0.3m，支管选用ϕ40PE黑管。

(3) 微喷灌系统的灌溉设计示例

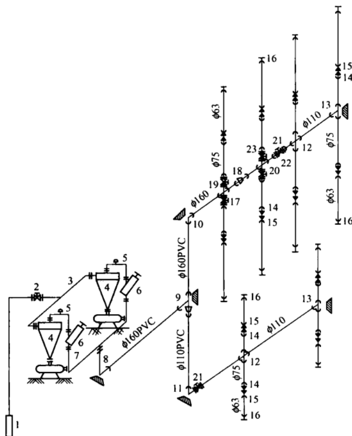


图 5-25　管系结构图（方案一）

1—潜水泵；2,19,21—闸阀；3,5,7—联轴管；
4—沙石过滤器；6—筛网过滤器；8,10,11—弯头；9,13—三通；
12,17,23—四通；14,15,18—变径；16—堵头；20,22—单丝管

微喷灌的灌水定额、灌水周期、一次灌水时间，以及管道系统的水力计算、水泵系统的设计与滴灌系统相同，所用大部分公式也一样，设计过程、计算方法参见本章。但对湿润比，微喷灌常用经验法确定。

微喷灌系统的参数设计有两部分：①灌溉参数，包括灌水定额、灌水强度、灌水周期、日需水量和泵站供水量（流量）等；②系统的水力计算，主要用于选择管材、管径、管网的合理布置和合理划分轮灌区域等。对后一部分计算，与滴灌系统方法相同。因此本节给出的计算过程只对前一部分的设计内容进行概括和归纳。将这一部分内容与管道系统的设计合并起来就可以形成一个完整的设计。因此对微喷灌的设计将结合一个柑橘园实例，说明微喷灌主要灌溉参数的设计过程。本例中橘园面积 40hm²，轻质土壤，间距 5m×4m。

① 土壤含水量计算

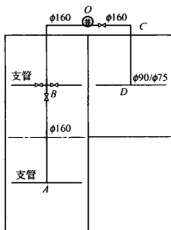


图 5-26 干支管布置图（方案二）

a. 确定月和日蒸发损失。在本例中，采用 A 级蒸发皿确定月最大耗水量，当地 7 月份月蒸发最大值为 222mm。在不同的气候条件下，蒸发损失可能与自然降雨平衡，最热的月份不一定是灌溉系统的临界月份，而应依据降雨和作物生长的阶段。另一要考虑的因素是雨量和分布，如果月降雨量是 30mm，而任何一天降雨都小于 5mm，此降雨量可忽略不计。本例中日最大耗水量为 7.1mm。

表 5-31 设计结果

名 称	规 格	数 量	单价/元	复价/元
内丝弯头	Dg25	2 只	3.5	7.00
外丝接头	Dg25	2 只	2.5	5.00
施肥罐	Dg25	1 只	66.00	66.00
	10L	1 只	215.00	215.00
过滤器	Dg25×120 目	1 只	66.00	66.00
中心阴螺纹三通	φ32×1in×φ32	1 只	10.60	10.60
PE 黑管	φ32	100m	3.60	360.00
堵头	φ16	2 只	6.10	12.20
	φ32	100 只	0.90	90.00
旁通	φ16	100 只	0.65	65.00
滴灌管	0.3m	700m	1.00	700.00
直通	φ16	10 只	0.80	8.00
	φ32	1 只	10.40	10.00
				合计 1614.80

b. 选择作物系数。柑橘高峰季节的作物系数为 0.6。

c. 日净需水量。日最大耗水量乘以作物系数，即 7.1×0.6=4.3（mm）

d. 田间持水量计算。有条件可采用实测法，以保证准确确定灌水量。设计时

往往根据土壤等情况选定一个常数。本例中田间持水量为11.33%（重量比）。

e. 凋萎点含水量计算。本例中平均凋萎系数为4.25%（重量比）。

f. 有效含水量（重量比）。田间持水量与柑橘凋萎系数之差就是能被作物利用的有效含水量，即

$$11.33\%-4.25\%=7.08\%$$

g. 有效含水量（体积比）。若该土壤干容重为$1.3g/cm^3$，则体积比有效含水量为

$$7.08\%\times1.3=9.2\%$$

h. 根区有效水量。有效含水量体积比乘以根区深度（1.2m）为柑橘根区有效水量，

即 $$9.2\%\times1200=110.4\ (mm)$$

② 设计参数

a. 计算净灌水量。如果作物将可利用水全部吸收，则必须克服不断增大的土壤水分张力，结果将导致减产。以柑橘为例，只利用可利用土壤含水量的40%，小水勤灌，保持低土壤水分张力，对作物更加有利。所以，110.4mm总可利用水量应予以修正，得出净灌溉水量为110.4×40%＝44.16mm。

根据这一计算，当土壤中还有60%可利用水分时，就应开始灌溉，以补充不足。

b. 净灌水量。微喷灌溉过程中，灌溉面积占土壤面积的70%（湿润比为70%），因此净灌水量应为44.16×70%＝30.9mm。

c. 毛灌水量。计算时还必须考虑田间水的利用率。在满足以下3个条件时微喷灌的效率可超过95%。每平方米灌水量不超过前述的极限值；喷头的水量分布曲线较平缓（如带抗雾化装置的微喷头）；清除阻碍喷洒轨迹道的障碍（如树枝、杂草等）。

取一个保守的田间水利用率值90%，则毛灌水量为：

$$30.9/90\%=34.3\ (mm)$$

d. 灌水周期。确定灌水周期，应使用净灌水量值，即

$$30.9/4.3=7\ (d)$$

e. 日毛耗水量为：$\dfrac{毛灌水量}{灌水周期}=\dfrac{34.3}{7}=4.9\ (mm/d)$

f. 泵站抽水流量为：

$$\frac{毛需水量\times C\times 面积}{水泵日工作参数\times 轮灌周期}=\frac{34.3\times10\times40}{21\times7}=93.4\ (m^3/h)$$

式中，C为日耗水量单位由mm向m^3/hm^2的转换系数。

g. 作物。株行距为4m×7m，每棵树占地$28m^2$，则每公顷面积柑橘树为357

棵，总棵数为 14285。

h. 每公顷灌水量：$\frac{34.3\times 10000}{1000}=343$

i. 每棵树的灌水定额：343000/357＝960（L/棵）

j. 每棵树的日灌水量：960/7＝137［L/（天·棵）］

k. 一次灌水时间：$\frac{每棵树的灌水量}{微喷头流量}=\frac{960}{80}=12$（h）

l. 轮灌组数和每轮灌组的面积：

$$轮灌组数=\frac{灌水周期\times 系统每天工作时间}{一次灌水时间}=\frac{7\times 21}{12}=12$$

$$日工作组数=\frac{轮灌组数}{轮灌天数}=\frac{12}{7}=1.7$$

$$每个轮灌组面积=\frac{40}{12}=3.33\ (hm^2)$$

m. 每棵树的灌溉面积（本例中采用的湿润比为 70%）：

$$树占地面积\times 湿润比=28m^2\times 70\%=19.6\ (m^2)$$

$$\frac{每棵树占地面积}{0.785}=\frac{19.6}{0.785}=5\ (m)$$

③ 微喷头选型及校核

a. 微喷头选择。根据作物间距、土壤条件，选择绿源公司生产的旋转式微喷头。参数：设计工作水头 20m，橙色喷嘴直径 1.5mm，流量 80L/h，喷洒直径 5m（小旋转散水器），橙色抗雾化接头。

b. 单位面积灌水量：$\frac{80\times 12}{19.6}=4.9$（$L/m^2$）

c. 设计灌水强度 ρ_s：每个微喷头流量为 80L/h，每棵占地面积为 $28m^2$，所以设计灌水强度为

$$\rho_s=\frac{80}{28}=2.9\ (mm/h)$$

d. 实际灌水强度：设计中必须考虑土壤的入渗能力，因此计算灌水强度时也应该用微喷头流量除以湿润面积，即

$$\rho=\frac{80}{19.6}=4.1\ (mm/h)$$

上述结果为平均灌水强度，最大灌水强度会更大。

设计基本参数汇总：地块面积为 $40hm^2$；灌水周期为 7 天；设备工作时间为 147h（6 天）；微喷头流量为 80L/h；泵站抽水流量为 $93.4m^3/h$；日需水量为 4.9mm；一次灌水量为 34.3mm；灌溉湿润深度为 1.20m；灌溉面积所占比例（湿润比）为 70%；轮灌组数为 12 次；微喷头喷洒面积为 $19.6m^2$；每公顷灌水量为 $343m^3/hm^2$。

5.6　渠道防渗工程技术

5.6.1　概述

5.6.1.1　渠道防渗的重要性和作用

① 提高渠系水利用系数　目前，我国已建渠道防渗工程 55 万多公里，仅占渠道总长的 18%，渠系水利用系数不足 0.5，每年渠道输水损失达 1730 亿立方米，占农业用水的 45%，水量浪费之大实在惊人。采取防渗措施后，这些水大部分可以保留。例如陕西省宝鸡峡灌区 98km 总干渠，防渗前每公里输水损失为 0.425%，用混凝土防渗衬砌以后，每公里输水损失降为 0.017%，减少输水损失 96%，使原来 98km 干渠输水损失水量由 $19m^3/s$ 降为 $0.76m^3/s$，每年可减少渗漏水量达 2.4 亿～2.9 亿立方米。大量工程实践证明，采用砌石防渗可以减少渗漏损失 50%～60%，混凝土防渗可减少渗漏 70%～80%，塑膜防渗可减少渗漏损失 80%～90%，管道输水可减少渗漏损失 95%以上。

② 防止土壤盐碱化和沼泽化　渠道防渗提高了水的利用率，扩大了灌溉面积，减少了渗漏，有利于控制地下水位，防止土壤盐碱化的发生。例如甘肃河西走廊中游泉水溢出带在 20 世纪 50 年代地下水位很高，存在着大片盐碱荒地，而通过 60 年代修建水库，衬砌渠道使地下水位下降，这些盐碱地已改造为高产耕地，生态环境得到改善。

③ 固渠除险，提高抗冲刷能力　渠道防渗工程，除防渗作用外，还具有防冲刷、防淤积、防塌岸，保证输水安全的作用。例如，陕西省宝鸡峡总干 98km 的塬边渠道，渠床为湿陷性黄土古滑坡体，修建前人们担心渠道行水安全问题，由于采用了较好的防渗措施，工程建成投运至今安然无恙。

④ 节约投资和运行费用　据甘肃省的经验，节省或增加单方水所需的费用，开源工程为 4.4～8.7 元/m^3，干渠衬砌为 0.8～1.0 元/m^3，斗农渠防渗为 1.2～1.5 元/m^3，低压管道输水为 1.4～1.6 元/m^3，滴灌技术采用国产设备为 2.0～3.5 元/m^3；据新疆的经验，渠道防渗每亩地的投资约为建库蓄水每亩地投资的 1/3；河北省渠道防渗节省每立方米水投资 0.24 元，而建库蓄水每立方米水需投资 0.33 元；湖南省渠道防渗节省每立方米水平均投资 0.2～0.25 元，而建库引水每立方米水需投资 0.5～0.8 元。因此，与节水工程的其他环节相比，渠道防渗的效果十分明显。

5.6.1.2　渠道防渗工程技术发展趋势和水平

为了节约用水，延长工程寿命，国内外的灌溉渠道均采用了不同结构型式和不同防渗材料的衬砌。美国把渠道防渗作为水利工程挖潜措施之一。以混凝土、砂砾料覆盖的膜料、压实土等为防渗材料，施工机械化程度高，大型渠道衬砌有全断面

和半断面衬砌机。日本曾使用过砌石、膜料，现今主要用混凝土和钢筋混凝土，在冻害严重地区采用换填砂砾料、设置保温层措施；渠道多为L型预制混凝土矩形断面；对防渗结构的接缝止水材料非常重视，采用了橡胶止水带、管装密封胶等新材料。这些措施，在我国寒区工程建设中也有采用，但因成本高，难以推广。我国更多的是根据各地不同的土质、水分、气候条件，始终以开发性能好、价格低、易施工的防渗材料为先导，研究、推广与其相适应的防渗断面形式与防渗层结构；针对北方地区工程冻害问题，研究冻胀防治技术，取得了不少优秀成果。概括起来，表现出如下几个趋势。

(1) 渠道防渗新材料

目前国内外所用的防渗材料，温暖地区常用砌石、三合土、水泥土、灰土和压实土等；寒冷地区常用砌石、混凝土、膜料、固化土等。沥青混凝土虽具有高抗渗性，低温柔性和裂缝自愈等突出优点，但目前料源不足，施工复杂，推广较慢。

① 膜料防渗 PE、PVC及其改性塑膜，经过20～30年的运用仍基本完好，充分显示了塑膜防渗性能好、质轻、延伸性强、造价低等特点，已迅速在全国渠道防渗工程上推广应用。PVC复合土工膜具有竖向防渗、水平导水、透气等多项功能，不仅在弱冻胀地区得到了广泛应用，而且在地下水浅埋或有旁渗水的渠道上亦有采用。但在渠道防渗工程建设中存在对膜料选择不准确，应用不合理的现象，急需编制膜料在渠道工程应用的统一标准。

② 新型接缝止水材料 伸缩缝填料已由最初的沥青砂浆，发展到聚氯乙烯塑料胶泥，焦油塑料胶泥，近年来研究出可在常温下和潮湿界面使用的石油沥青聚氨酯弹塑性接缝材料等，施工方便，其缝型构造和施工工艺有待进一步实践和推广。

③ 新型防冻害保温材料 严寒地区，渠道防渗采取保温措施较多。近年来，经过实验，已成功地采用聚苯乙烯泡沫塑料板铺于防渗层下，可通过保温防治冻害。另外，西北农林科技大学研制出的引气黏土陶粒混凝土和山东水科所研制的膨胀珍珠岩板集抗渗、抗冻、保温“三位一体”，对微寒地区的冻害防治具有重要意义。

④ 土壤固化剂 土壤固化剂是最近发展起来的新型建筑材料，将其加入土壤中，可增强土体憎水性，降低土体水的冰点，阻止土冻结时的水分迁移，从而减轻或消除冻胀，提高土体抗渗能力。土壤固化剂能在常温下直接胶结土壤颗粒，并能与黏土矿物发生化学反应，生成胶凝物质。因而固化后的土体具有一定抗压、抗渗、抗冻性能。初步研究表明，固化土28天强度可达3～20MPa，渗透系数一般为10^{-6}～10^{-8}cm/s，但抗冻性较差.直接应用于北方地区，其耐久性远不如混凝土理想。可利用固化土良好的不透水性，试验研究板膜与固化土的复合方案。

⑤ 外加剂，粉煤灰等掺合料的应用 试验证明，掺粉煤灰混凝土的强度、抗渗性和抗冻性在采用一定技术措施后，都能满足渠道衬砌混凝土的要求。不仅如此，在耐硫酸盐及其他盐类侵蚀方面优于普通混凝土。因此，大掺量粉煤灰高性能

混凝土可望成为降低渠道衬砌工程造价的一个突破口。

(2) 渠道断面形式

提高防渗和防冻胀效果，必须配合良好的渠道断面形式。多年的实践证明，中小型渠道以 U 形断面为最佳，大型渠道采用弧底梯形、弧形坡脚梯形渠，无论从水流条件还是结构方面都较理想。但这些断面形式在工程实际中亦有不同程度的冻害出现。

(3) 渠道防渗衬砌结构型式

在微冻胀地区，陕西省泾、洛、渭三大灌区的生产实践表明，混凝土肋梁板、楔形板、中厚板、槽形板、空心板等特殊的结构形式，在一定程度上可减轻冻胀破坏。在冻胀严重地区较成熟的防渗防冻胀措施有：板膜复合、板与换填砂砾料复合、板与保温材料复合、设置冻胀变形缝等结构形式。板膜复合结构两种材料扬长避短，显示了明显的经济技术性能，在陕西关中九大灌区世行贷款更新改造项目中已经推广应用，取得了良好的效果。

(4) 渠道冻胀破坏机理与防治措施

20 世纪 50 年代末开始应用混凝土作渠道防渗措施后，受到衬砌工程遭受裂缝、鼓胀、坍塌等破坏现实的启示，人们认识了“冻胀”这个祸首。在不断总结工程实践经验的基础上，从“抵抗”冻胀的观点，逐步转移到“适应、削减或消除冻胀”的防冻害原则和技术措施，归纳出“土、水、温、力”是冻胀产生的必备条件，提供了冻胀预报模式和基土冻胀性分类方法；提出了埋入法、置槽法、架空法等回避冻胀的措施，置换、隔热保温、化学处理、压实基土、隔水排水等削减冻胀的措施，以及通过优化结构以适应、回避或局部抵抗冻胀的措施，这套技术符合国情，成效显著。

(5) 施工机具

施工机具是提高工程质量和加快工程进度的重要条件。这方面的研究一度曾出现过高潮，随着国民经济的发展，施工机械化程度的要求会愈来愈高，是今后发展的方向。从 20 世纪 70 年代末，研究 U 形渠道施工机械开始，相继研究开发出 U 形渠道开渠机，U 形渠道衬砌机，大中型 U 形渠道喷射法施工等技术。这些工程机械设备的研制和应用，对提高防渗工程质量、加快施工进度、降低工程造价和提高工程效益起到了良好的作用，使我国渠道防渗个性化技术向机械化方向迈出了可喜的一步。

5.6.2 渠道防渗工程设计和施工的基本规定

5.6.2.1 基本资料的收集

渠道防渗工程的设计、施工和管理应按《灌溉排水渠系设计规范》的规定搜集、整理如下其本资料。

(1) 水文气象、地质和地形资料

① 应收集水源含沙量、水质、降水量、蒸发量、气温、负气温积值、冻结历时和土壤冻深等水文气象资料。

② 应取得渠道沿线岩石与土壤分类、断层、裂隙、滑坡相隐患等工程地质资料，以及土壤的颗粒组成、含水量、干密度、孔隙率、流塑限、有机质、可溶盐、冻胀性、湿陷系数、渗透系数等物理、力学、化学性质资料，必要时还应有土体的抗剪强度指标。

③ 地下水埋深小于 5m 时，应取得地下水埋深、流向、补给与排泄条件、水质与污染源等水文地质资料。

④ 应取得灌区地形图、渠系平面布置图和渠道纵横断面图，必要时还应有带状地形图。

(2) 建筑材料和施工条件资料

① 应搜集渠道附近的水泥、石灰、砂、石、膜料、沥青等建筑材料的产源、产（储）量、质量、开采与运输条件、单价等资料。

② 应取得施工机械设备、技术人员、劳力供给、施工用水、电源、交通、通讯和工期要求等施工条件资料。

(3) 其他资料

① 扩建、改建工程，应对渠道渗漏情况进行调查，取得原渠道的水力要素和渗漏量等资料。

② 应取得建设单位对工程运用的要求、当地已建成渠道防渗工程的设计与施工资料、管理运用经验、试验研究成果和竣工验收报告等资料。

5.6.2.2 渠道防渗措施选择

当土壤渗漏量大，渠系水利用系数不满足规定，或者水资源紧缺以及有特殊要求的渠道，均应进行防渗衬砌。选择防渗措施时应根据气候条件、地形条件、基土性质、地下水位、防渗标准、工程投资等因素，进行技术经济论证，务使设计方案技术先进、经济合理、运用安全、管理方便。目前，常用土料、石料、膜料、混凝土和沥青混凝土建立防渗层，也利用上述材料构成复合结构，达到防渗目的。各种渠道防渗材料的技术特点、防渗效果、运用条件等见表 5-32。选用衬砌材料时，应根据渠道大小、防渗效果、使用年限等工程要求，按照因地制宜，就地取材的原则合理确定。

5.6.2.3 防渗渠道的设计

(1) 渠道断面形式

渠道断面形状有梯形、矩形、U 形、复合形等多种形式，如图 5-27 所示，不同防渗材料适宜的断面形式可按表 5-33 选用。

梯形断面施工简单，边坡稳定，在地形、地质无特殊问题的地区，普遍适用于大、中、小型渠道。

表 5-32　各种防渗材料的防渗效果及适用条件

防渗材料类别		主要原材料	防渗效果 /[m³/(m²·d)]	使用年限 /年	适用条件
土料类	1. 素土 2. 黏砂混合土	素土、石灰、砂、石等	0.07～0.17	5～15	能就地取材，造价低，施工简便，但抗冻性差，耐久性较差，需劳力多，质量不易保证。适用于气候温和地区的中、小型渠道
	3. 三合土 4. 四合土 5. 灰土			10～25	
水泥土类	1. 干硬性水泥土 2. 塑性水泥土	壤土、砂壤土、水泥	0.06～0.17	8～30	能就地取材，造价较低，施工较容易，但抗冻性差。适用于温和地区，且附近有土壤和砂壤土的渠道
石料类	1. 浆砌料石 2. 浆砌块石 3. 浆砌卵石 4. 浆砌石板	料石、块石、卵石、石板、水泥、石灰、砂等	0.09～0.25	25～40	抗冻和抗冲性能好，施工简易，耐久性强，但防渗能力一般较难保证，需劳力多。适用于石料来源丰富、有抗冻与抗冲要求的渠道
	5. 干砌卵石挂淤		0.20～0.40		
埋铺式膜料类	1. 土料保护层 2. 刚性保护层	膜料、土料、砂、石、水泥等	0.04～0.08	20～30	防渗能力强，质轻、运输便利，当用土作保护层时，造价较低，但占地多，允许流速小。适用于中、小型低流速渠道。当用刚性保护层时，造价较高，可用于大、中型渠道
沥青混凝土类	1. 现场浇筑 2. 预制铺砌	沥青、砂、石、矿粉等	0.04～0.14	20～30	防渗能力强，适应冻胀变形能力较好，造价与混凝土相近，但目前沥青料源缺乏。一般适用于有冻害的地区，且附近有沥青料源渠道
混凝土类	1. 现场浇筑	砂、石、水泥等	0.04～0.14	30～50	防渗、抗冲性能好，耐久性强。适用于不同地形、气候和运用条件的大、中、小型渠道
	2. 预制铺砌		0.06～0.17	20～30	
	3. 喷射法施工	砂、石、水泥、速凝剂等	0.05～0.16	25～35	优点同上。但需较多的施工设备，施工较繁杂。多用于基础为岩石的渠道

矩形断面工程量小，适用于坚固石渠，如傍山或塬边渠道以及宽深比受到限制的城镇地区，可以采用钢筋混凝土矩形断面或石矩形断面。

弧底梯形、弧形坡脚梯形、U形渠道等，水力条件好、占地少、整体性好、适应冻胀变形能力强，在一定程度上减轻了冻胀变形的不均匀性，在北方地区特别是在小型渠道上得到了推广应用。

多边形断面适用于在粉质砂土地区修建的渠道。渠床位于不同土质的大型渠道，亦采用之。

暗渠具有占地少，安全性高，水流不易污染，可避免冻胀破坏等优点。因此，

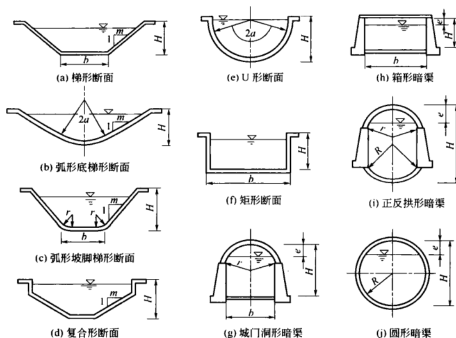


图 5-27　防渗渠道的断面形式

在土地资源紧缺地区，如江苏省应用较多。新疆、甘肃等冻胀严重地区亦有采用。

表 5-33　不同材料防渗渠道适用的断面形式

渠道 / 防渗材料类别	防渗渠道的断面形式									
	明渠						暗渠			
	梯形	矩形	复合形	弧形底梯形	弧形坡脚梯形	U 形	城门洞形	箱形	正反拱形	圆形
素土	√	√	√	√	√					
灰土	√			√	√		√		√	
黏砂混凝土	√			√	√					
膨润混合土	√			√	√					
三合土	√	√	√	√	√		√		√	
四合土	√	√	√	√	√		√		√	
塑性水泥土	√		√	√	√					
干硬性水泥土	√	√	√	√	√		√		√	
料石	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
块石	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
卵石	√		√	√	√	√	√		√	
石板	√		√	√	√					
土保护层塑膜	√			√	√					
沥青混凝土	√			√	√					
混凝土	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
刚性保护层塑膜	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

（2）设计参数确定

① 渠底比降 i　渠底比降选择是否合理，关系到渠道输水能力大小及其冲淤问题，也关系到灌溉面积的大小和工程造价。灌区地形，土壤条件、水源含沙量，渠道设计流量等均影响渠道比降的选择，实际设计中应综合考虑多种因素，通过反复试算确定，比降 i 选定的一般原则和方法是：渠道比降应尽可能适应地形，避免挖、填方量过大；在满足不冲不淤的条件下，宜采用较缓的渠底比降，以控制较多的灌溉面积和满足自流灌溉的需要；土壤易冲刷的渠道，比降应缓；地质条件较好的渠道比降可适当陡一些，表 5-34 给出了我国部分灌区的土质输水干渠的比降，可供参考。

表 5-34　我国部分灌区的土质输水干渠的比降

渠道名称	流量/(m^3/s)	土　壤	比　降	备　注
京密引水干渠	70～40	砂土、壤土	1/17000	清水，部分衬砌
石津灌区总干渠	100	壤土	1/5000	浑水
人民胜利渠总干渠	60	壤土	1/3000～1/4600	浑水，个别渠段为 1/1800
鸭河口灌区	134	黏土	1/10000～1/15000	清水
打渔张灌区总干渠	60	黏土、壤土	1/7000～1/10000	浑水
汾河干渠	78	砂土、壤土	1/5000	浑水
镫口扬水灌区	50	壤土	1/10000	浑水
唐徕渠	140	淤灌草甸土	1/7000	浑水
河套灌区	480	壤土	1/8000	浑水
疏勒河灌区	32	壤土	1/250	浑水
宝鸡峡总干渠	50	壤土	1/4000～1/5000	浑水，已全部衬砌
查哈阳灌区	50	黑钙土	1/5000～1/8000	清水
都江堰人民渠	93	壤土	1/2500～1/3000	清水，部分衬砌
都江堰东风渠	50	黏壤土	1/8000	清水，部分衬砌
引丹总干渠	35	黏土	1/10000	清水
韶山灌区	46	壤土	1/5000～1/10000	清水，部分衬砌
淠史杭总干渠	300	黏壤土	1/20000～1/28000	清水，部分衬砌
青年运河灌区	110	泥质板岩风化土、砂土	1/10000～1/12000	清水
清平灌区东干渠	14	砂壤土	1～6000	清水

② 渠床糙率 n　渠床糙率是反映渠床粗糙程度的技术参数，可按表 5-35 选用。糙率 n 愈大，表示渠道愈粗糙，过水能力小；n 值愈小，渠道愈光滑，过水能力愈大。

③ 允许流速　渠道设计流速应满足不冲不淤要求，以保证渠道断面稳定。为了减小渠道断面，设计中常选用允许流速中的较大值。渠道允许流速取决于渠床土质、衬砌所用材料、渠道流量大小、渠道断面水力要素、水流含沙量诸多因素。因此，选择允许流速必须根据当地条件进行充分的调研，最好采用类比的方法确定。一般防渗渠道的不冲流速可按表 5-36 选用，黄土地区的不淤流速按《灌溉排水渠系设计规范》的规定计算确定。

表 5-35 渠床糙率

	渠道流量/(m^3/s)	渠槽特征	灌溉渠道	泄(退)水渠道
土渠	>20	平整顺直，养护良好	0.0200	0.0225
		平整顺直，养护一般	0.0225	0.0250
		渠床多石，杂草丛生，养护较差	0.0250	0.0275
	20～1	平整顺直，养护良好	0.0225	0.0250
		平整顺直，养护一般	0.0250	0.0275
		渠床多石，杂草丛生，养护较差	0.0275	0.0300
	<1	渠床弯曲，养护一般	0.0250	0.0275
		支渠以下的固定渠道	0.0275	0.0300
		渠床多石，杂草丛生，养护较差	0.0300	0.0350
石渠	渠槽表面的特征		糙率	
	经过良好修整		0.0250	
	经过中等修整无凸出部分		0.0300	
	经过中等修整有凸出部分		0.0330	
	未经修整有凸出部分		0.0350～0.0450	
砌护渠	防渗衬砌结构类别及特征		糙率	
	黏土、黏砂混合土、膨润混合土	平整顺直，养护良好	0.0225	
		平整顺直，养护一般	0.0250	
		平整顺直，养护较差	0.0275	
	灰土、三合土、四合土	平整，表面光滑	0.0150～0.0170	
		平整，表面较粗糙	0.0180～0.0200	
	水泥土	平整，表面光滑	0.0140～0.0160	
		平整，表面较粗糙	0.0160～0.0180	
	砌石	浆砌料石、石板	0.0150～0.0230	
		浆砌块石	0.0200～0.0250	
		干砌块石	0.0250～0.0330	
		浆砌卵石	0.0230～0.0275	
		干砌卵石，砌工良好	0.0250～0.0325	
		干砌卵石，砌工一般	0.0275～0.0375	
		干砌卵石，砌工粗糙	0.0325～0.0425	
	沥青混凝土	机械现场浇筑，表面光滑	0.0120～0.0140	
		机械现场浇筑，表面粗糙	0.0150～0.0170	
		预制板砌筑	0.0160～0.0180	
	混凝土	抹光的水泥砂浆面	0.0120～0.0130	
		金属模板浇筑，平整顺直，表面光滑	0.0120～0.0140	
		刨光木模板浇筑，表面一般	0.0150	
		表面粗糙，缝口不齐	0.0170	
		修整及养护较差	0.0180	
		预制板砌筑	0.0160～0.0180	
		预制渠槽	0.0120～0.0160	
		平整的喷浆面	0.0150～0.0160	
		不平整的喷浆面	0.170～0.0180	
		波状断面的喷浆面	0.0180～0.0250	

表 5-36　防渗衬砌渠道允许不冲流速

防渗衬砌结构类别			允许不冲流速/(m/s)
土　料	黏土、黏砂混合土		0.75～1.00
	灰土、三合土、四合土		<1.00
水泥土	现场填筑		<2.50
	预制铺砌		<2.00
砌　石	干砌卵石(挂淤)		2.50～4.00
	浆砌块石	单　层	2.50～4.00
		双　层	3.50～5.00
	浆砌料石		4.0～6.0
	浆砌石板		<2.50
膜　料（土料保护层）	砂壤土、轻壤土		<0.45
	中壤土		<0.60
	重壤土		<0.65
	黏　土		<0.70
	砂砾料		<0.90
沥青混凝土	现场浇筑		<3.00
混凝土	预制铺砌		<2.00
混凝土	现场浇筑		<8.00
	预制铺砌		<5.00
	喷射法施工		<10.00

注：表中土料类和膜料类（土料保护层）防渗衬砌结构允许不冲流速值为水力半径 $R=1.0$m 时的情况；当 $R\neq1.0$m 时，表中所列数值应乘以 R^a。指数 a 值可按下列情况采用：①疏松的土料或土料保护层，$a=1/3\sim1/4$；②中等密实和密实的土料或土料保护层，$a=1/4\sim1/5$。

④ 边坡系数 m　渠道的边坡系数是直接影响到渠道能否稳定和安全运行的重要的因素之一，应根据渠道衬砌及防渗材料的不同、渠道大小及基础情况等计算确定或选用。

梯形断面水深小于 3m 的土料防渗渠道的最小边坡系数可按《灌溉排水渠系设计规范》的规定取用；水深大于 3m 或地下水位较高的挖方渠道，边坡系数应根据稳定分析计算确定；采用刚性衬砌的挖方渠道，边坡系数可适当减小。

⑤ 超高 F_b　为了防止风浪引起渠水漫溢，保证渠道安全运行，挖方渠道的渠

岸和填方渠道的堤顶均应高于渠道加大水位，此即安全超高。渠道岸顶超高可按公式（5-35）计算确定，渠道衬砌超高可按表 5-37 选用。

$$F_b=\frac{1}{4}h_b+0.2 \tag{5-35}$$

式中　F_b——渠道岸顶超高，m；

h_b——渠道通过加大流量时的水深，m。

⑥ 渠顶宽度 D　堤顶宽度取决于流量大小和填方高度，可按表 5-38 确定。渠顶兼作交通道路时，其宽度应满足车辆通行要求。

表 5-37　防渗渠道的防渗层超高

$Q/(m^3/s)$	<1	1～5	5～30	>30
$\Delta h/m$	0.15～0.20	0.20～0.30	0.30～0.60	0.60～0.80

表 5-38　防渗渠道的堤顶宽度

$Q/(m^3/s)$	<1	1～5	5～30	>30
D/m	0.60～1.0	1.0～2.0	2.0～2.5	2.5～4..0

（3）梯形（矩形）断面设计

梯形、矩形断面设计，通常是选择相关的设计参数后，防渗渠道的断面尺寸应通过水力计算确定，选择实用经济断面。渠道的宽深比直接关系断面的稳定，地下水位较高时，若采用窄深式渠道断面，则将引起水下挖方量较大，为施工带来困难；或当土壤的冻胀性较强，采用窄深式渠道断面将加大渠道边坡的不均匀冻胀，在消融时又可能引起滑塌，就应采用宽浅式渠道断面形式。一般混凝土等刚性材料衬砌的渠道，宽深比为 1～2；素土夯实防渗渠道和素土保护层膜料防渗渠道的宽深比为 1～4。

（4）U 形断面水设计

工程实际中 U 形渠道一般为混凝土衬砌，采用图 5-28 所示的直线段外倾的非标准 U 形断面，U 形断面的过水断面面积和湿周亦可采用式（5-36）～式（5-39）进行计算。

$$A=K_a h^2 \tag{5-36}$$

$$\chi=K_\chi h \tag{5-37}$$

$$K_a=\left(\frac{\theta}{2}+2m-2m'\right)K_r^2+2(m'-m)K_r+m \tag{5-38}$$

$$K_\chi=2\left(m+\frac{\theta}{2}-m'\right)K_r+2m' \tag{5-39}$$

式中，h 为水深，m；$\theta/2$ 为圆心角之半，（°）；m 为直线段边坡系数；$m'=$

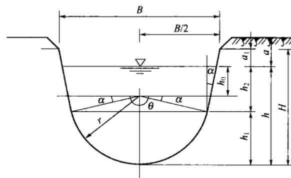


图 5-28　U 形断面

B—渠口宽；r—圆弧半径；θ—圆心角；

α—倾角；h—水深；h_1—圆弧段水深；H—槽深

$\sqrt{1+m^2}$；$K_r=\frac{r}{h}$；r 为圆弧半径，m；χ 为渠道湿周，m。

参数 $K_r=r/h$ 实际反映了渠道的宽深比 B/H，设计中可通过对 K_r 值的选取来控制 U 形渠道的窄深（或宽浅）程度。由式（5-36）～式（5-39）可推得 U 形渠道的水力最佳断面时 $K_r=1$，即水面线刚好通过圆心。实际设计中往往选用更小的 K_r 值将渠道设计得更为窄深一些，以充分利用混凝土护面抗冲能力强的特点，减少渠道占地。

当渠顶以上挖深不超过 1.5m，边坡系数不大于 0.3，渠线经过耕地时，K_r 值可按表 5-39 选用；填方渠道或渠顶以上挖深很小以及土质较差时，K_r 值取 1.0～0.8。

表 5-39　U 形渠道的 K_r 值

$m(\alpha)$	0(0°)	0.1(5.7°)	0.2(11.3°)	0.3(16.7°)	0.4(21.8°)
K_r	0.65～0.72	0.62～0.68	0.56～0.63	0.49～0.56	0.39～0.47

注：挖深大、土质好、土地价值高时取小值。

5.6.3　砌石防渗

砌石防渗包括干砌卵石、干砌块石、浆砌卵石、浆砌块石、浆砌石板等多种形式，其优点主要表现为：①就地取材，山丘及河滩地区多有丰富的石料；②抗冲流速大，浆砌石渠道抗冲流速可达到 6.0～8.0m/s，干砌石可达到 2.0～5.0m/s；③防渗效果好，施工质量有保证的浆砌石可减少渗漏损失 80%，干砌石可减少 50%左右；④抗冻害能力强，砌石防渗厚度较大，相当于采取了部分置换措施，且加大了抗力，从而减轻了冻害；⑤施工技术简单、群众易于掌握，我国劳动人民具有丰富的砌石技术和经验。故砌石防渗是我国应用最早、应用较为广泛的渠道防渗

措施。

5.6.3.1 干砌石

干砌卵石渠道多采用梯形和弧底梯形，采用单层干砌石时，其厚度一般为20～40cm。渠底常为25～30cm，渠坡衬砌厚度常为20～25cm。干砌卵石通常设置垫层，其目的是防止水流淘刷基础，同时也有防冻和排水的作用。渠床为砂砾石，若流速小于3.5m/s，可不设垫层；流速超过3.5m/s，设粒径为2～4cm、15cm厚的砂砾石垫层。渠床为土质（砂土、壤土、黏土）时，砂砾石垫层厚度应大于25cm。

5.6.3.2 浆砌石

浆砌石渠道防渗是我国目前常采用的一种防渗措施，防渗防冲效果均优于干砌石。浆砌石渠道通常采用梯形断面，有时亦采用渠坡为挡土墙的断面。梯形断面较挡土墙式断面工程量小，造价低，是一件较普遍的形式。如陕西省泾惠渠总干渠采用浆砌卵石，其衬砌渠底30cm，边坡系数为1.0，以M1.0石灰砂浆砌石，M7.5水泥砂浆勾缝，多年运用尚好。护面式防渗层厚度采用浆砌料石时15～25cm，浆砌块石20～30cm，浆砌石板不小于3cm；挡墙式断面顶宽可为20～30cm。

每隔20～50m留一条伸缩缝。缝宽3cm左右，以沥青水泥砂浆（重量配合比为沥青：水泥：砂子＝1：1：4）填充即可。大中型渠道宜用水泥砂浆、水泥石灰混合砂浆或细石混凝土砌筑，用水泥砂浆勾缝。砌筑砂浆的抗压强度一般为5.0～7.5MPa，勾缝砂浆的抗压强度一般为10～15MPa；小型渠道可采用水泥黏土、石灰黏土混合砂浆砌筑。

5.6.4 混凝土防渗

5.6.4.1 混凝土防渗的特点和适用范围

混凝土衬砌渠道是目前应用最为广泛的一种渠道防渗措施，其优点主要有：

① 防渗效果好，一般能减少渗漏90%～95%；

② 输水能力大，混凝土护面糙率小，n=0.014～0.017，沿程水头损失小，抗冲流速大，一般为3～5m/s，从而大大减小了渠道断面尺寸和渠道建筑物尺寸；

③ 经久耐用，正常情况下，混凝土衬砌渠道可运用40～50年；

④ 便于管理，混凝土衬砌不生杂草，减少了淤积；

⑤ 适用范围广，混凝土具有良好的模塑性，可根据需要通过配合比调整、原材料选取，制成各种性能的混凝土，也可设计成不同的形状和尺寸的结构。

因而，混凝土衬砌适用于各种地形、气候和运行条件的大、中、小型渠道。虽然一次性投资较大，但维修费用低，管理方便，效益较高。如陕西省宝鸡峡塬边总干渠，设计流量50m^3/s，用混凝土防渗，除减少土方、渠道建筑物工程量和渠道占地，保证渠道行水安全外，还减少渗漏损失约19m^3/s，相当于增加了一个灌溉3.33万公顷农田的水利设施。

5.6.4.2 技术要求

渠道衬砌用混凝土等级应根据工程规模、水文气象和地质条件以及防渗要求等因素确定，应具有不透水性，抗冻性和足够的强度，其设计等级不低于表 5-40 中的数值；严寒地区和寒冷地区的冬季行水渠道，抗冻等级应比表 5-40 内的数值提高一级。

表 5-40 混凝土性能的允许最小值

工程规模	混凝土性能	严寒地区	寒冷地区	温和地区
小型	强度(C)	15	15	15
	抗冻(F)	50	50	-
	抗渗(W)	4	4	4
中型	强度(C)	20	15	15
	抗冻(F)	100	50	50
	抗渗(W)	6	6	6
大型	强度(C)	20	20	15
	抗冻(F)	200	150	50
	抗渗(W)	6	6	6

注：1. 强度等级的单位为 MPa。

2. 抗冻等级的单位为冻融循环次数。

3. 抗渗等级的单位为 0.1MPa。

4. 严寒地区为最冷月平均气温低于－10℃；寒冷地区为最冷月平均气温不低于－10℃，但不高于－3℃；温和地区为最冷月平均气温高于－3℃。

5.6.4.3 防渗层型式与结构尺寸

（1）结构型式

混凝土衬砌目前采用的结构型式有板型、槽型和管型等。广泛应用的是板型结构，其衬砌边坡截面有矩形等厚板、楔形板、肋梁板、中部加厚板、Π 形板、空心板、U 形槽等，如图 5-29 所示。

等厚板因施工简便，质量容易控制，造价较低，在一般地基上，只要施工得当，完全可以满足防渗和安全运行要求。目前，在我国南方地区，不论是现浇还是预制，广泛采用等厚板；北方地区预制法施工中，亦大部分采用等厚板。等厚板的主要缺点是适应冻胀变形能力差。

楔形板和肋梁板是在等厚板的基础上，为了使其承载能力更加合理而改进的结构型式。其优点是抗冻胀破坏能力强，裂缝较少，适用于有冻胀要求的现浇法施工。缺点是混凝土量有所增加，肋梁板增加了挖梁槽的工序，肋梁浇筑中容易出现粗骨料集中。

中部加厚板是在裂缝经常发生的部位，加厚混凝土板，增加其抗冻胀破坏的能力。陕西省冯家山灌区采用此结构型式，效果较好，证明了中部加厚板对防止冻胀破坏是有效的。

Π 形板利用板下空间的空气保温，减轻冻胀；使混凝土板与基土脱离接触，消

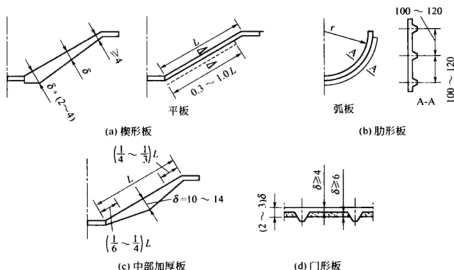


图 5-29　混凝土防渗层结构型式

除基土冻胀产生的变形；四周板肋又增加了抗冻胀破坏的能力，故适用于有冻胀破坏的渠道衬砌。

U 形渠槽水力性能佳、防渗效果好、抗冻胀能力强、省工省料、占地少、便于管理，目前在我国已得到广泛应用，这种槽形结构，可预制安砌，也可现浇施工；既可埋于土中，也可置于地面，甚至采用架空式结构。

（2）防渗层厚度及尺寸

防渗层的厚度及尺寸与基础、气温、施工条件、渠道大小及重要性有关，目前尚无适当的计算方法，一般根据经验选用。

等厚板的最小厚度，当渠道流速小于 3m/s 时，应符合表 5-41 的规定；流速 3～4m/s 时，最小厚度宜为 10cm；流速为 4～5m/s 时，最小厚度宜为 12cm。水流中含有砾石类推移质时，渠底板的最小厚度宜为 12cm。超高部分的厚度可适当减小，但不应小于 4cm。

表 5-41　混凝土防渗层的最小厚度

渠道设计流量/(m^3/s)	温和地区/cm			寒冷地区/cm		
	钢筋混凝土	素混凝土	喷射混凝土	钢筋混凝土	素混凝土	喷射混凝土
<2		4	4		6	5
2～20	7	6	5	8	8	7
>20	7	8	7	9	10	8

肋梁板和Ⅱ形板的厚度，比等厚板可适当减小，但不应小于 4cm。肋高宜为板厚的 2～3 倍。

楔形板的坡脚处的厚度，比中部宜增加 2～4cm。

中部加厚板加厚部位的厚度，宜为 10～14cm。

渠基土稳定且无外压力时，U 形渠和矩形渠防渗层的最小厚度，应按表 5-42 选用；渠基土不稳定或存在较大外压力时，U 形渠道和矩形渠一般宜采用钢筋混凝土结构，并根据外荷载进行结构强度、稳定性及裂缝宽度验算。

表 5-42　混凝土 U 形渠槽壁厚参考值

半圆形直径 D/cm	<50	50～75	75～100	100～125	125～150	150 以上
厚度 δ/cm	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10

预制混凝土板的尺寸，应根据安装、搬运条件确定。最小为 50cm×50cm，最大为 100cm×100cm。

5.6.4.4　伸缩缝设计

（1）伸缩缝间距

混凝土衬砌渠道包括其他刚性护面渠道，为了适应温度变化、混凝土本身收缩、冻胀基础不均匀沉陷等原因引起的变形，需布置适当间距的纵、横向伸缩缝。纵向缝一般设在边坡与渠底连接处；当渠底宽超过 6～8m，可在渠底中部另加纵缝；渠道边坡一般不设纵向缝，渠道较深，边坡较大，渠基土沉陷性差别较大时可适当分缝，并错缝砌筑。混凝土衬砌和其他刚性材料护面均须设置横向伸缩缝，其间距与基础、气候、厚度、混凝土强度等级及施工因素有关，设计时可按表 5-43 选用。

表 5-43　防渗渠道的伸缩缝间距

防渗渠道类别	防渗材料和施工情况	纵向伸缩缝间距/m	横向伸缩缝间距/m
土料	灰土，现场浇筑	5	3～5
	三合土或四合土，现场浇筑	8	4～6
水泥土	塑性水泥土，现场浇筑	4	2～4
	干硬性水泥土，现场浇筑	5	3～5
砌石	浆砌石	只设置沉降缝	
沥青混凝土	沥青混凝土，现场浇筑	8	4～6
混凝土	钢筋混凝土，现场浇筑	8	6～8
	素混凝土，现场浇筑	5	3～5
	素混凝土，预制铺砌	8	6～8

（2）缝型

伸缩缝应能适应混凝土板的伸缩和基础的微量变形；在变形时不漏水；结构简单，便于施工和修理。

混凝土衬砌的接缝型式很多，图 5-30 给出了几种工程实践中应用较多的缝型。其中图（a）、（c）为矩形缝，图（b）、（d）为梯形缝，以图（e）有塑料止水带的防渗性能最好。矩形缝结构简单，施工方便；如填料和施工不良，当混凝土收缩或基础沉陷等容易漏水。梯形缝内填料和混凝土呈斜面接触，在水压力下更易贴紧，

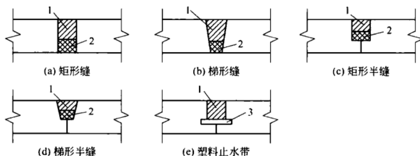


图 5-30 刚性材料防渗层伸缩缝形式

1—沥青砂浆；2—焦油塑料胶泥；3—塑料止水带

止水性能可靠。但这种缝形的填料容易被浮托力顶起，故不宜用于有地下水浮托力的渠段。梯形半缝曾用于陕西省宝鸡峡塬边渠道，效果良好。

上述 5 种缝型，可结合具体条件和要求选用。当渠道允许漏水，可选用施工方便、造价低的接缝形式如图（a）（b）。如不允许漏水，则应采取不透水性可靠缝型，如图（e）。

（3）缝宽

缝宽取决于间距、温差、混凝土干缩量、填料伸缩性和黏结力、施工要求等，一般采用 2～3cm。可按下述公式计算并取大值：

$$K_1\alpha(t_{max}-t_0)L\leqslant b\xi_c \tag{5-40}$$

$$K_2\alpha(t_0-t_{min})L\leqslant b\xi_p \tag{5-41}$$

$$K_3\xi_{yc}L\leqslant b\zeta_p \tag{5-42}$$

式中 K_1、K_2、K_3——安全系数，$K_1=1$、$K_2=2$、$K_3=2$；

α——混凝土线膨胀系数，$\alpha=10\times10^{-6}$；

t_0——施工期平均气温，℃；

t_{max}——当地最高气温，℃；

t_{min}——当地最低气温，℃；

ξ_c——t_{max}时填料的压缩系数，$\xi_c=0.1$；

ξ_p——t_{min}时填料的延伸系数，$\xi_p=0.15$；

ξ_{yc}——混凝土的干缩系数，$\xi_{yc}=4\times10^{-4}$；

L——缝的间距，cm；

b——缝宽，cm。

（4）填缝材料

伸缩缝填充材料应具有高温不流淌、低温不脆裂和良好的黏结力与伸缩性，过去常用沥青砂浆、聚氯乙烯胶泥（焦油塑料胶泥）和沥青油毡板等，但均存在性能差、造价较高、施工技术复杂等不足，并且聚氯乙烯胶泥（或焦油塑料胶泥）中含有煤焦油，对灌溉水和环境都有污染。进入 20 世纪 90 年代后，冷施工接缝材料相

继出现，如弹性聚硫密封材料、遇水膨胀橡胶止水条，前者造价太高，后者遇水反复膨胀效果不够理想，且施工较为麻烦。近年来，针对上述问题研制开发了石油沥青聚氨酯接缝材料（PTN）、高分子止水带及止水管等填充材料，止水性能好，施工方便，已经得到广泛应用。因此，《渠道防渗工程技术规范》（GB 50600—2010）中规定，伸缩缝的填充材料应采用黏结力强、变形性能大、耐温性好（在当地最高气温下不流淌、最低气温下不脆裂）、耐老化、无毒、无环境污染的弹塑性止水材料，如石油沥青聚氨酯接缝材料（PTN）、高分子止水带及止水管等。

① 石油沥青聚氨酯渠道接缝材料（PTN）　石油沥青聚氨酯渠道接缝材料（PTN）具有黏结力强（≥0.50MPa）、断裂伸长率高（≥450%）、耐温性好（−40℃不脆裂、+70℃不流淌）、耐老化、无毒、无环境污染、价格较低、适应潮湿界面以及常温下施工等优点。石油沥青聚氨酯渠道接缝材料（PTN）有关技术性能的测试结果见表 5-44。

表 5-44　石油沥青聚氨酯渠道接缝材料（PTN）的性能

项目	JC/T 482—2003 技术指标	PTN 技术指标
密度	规定值±0.1	1.40g/cm³
表干时间	≤24h	≤2h
适用期	-	≤4h
弹性恢复率	≥70%	96%(1h)
拉伸(60%)模量(−20℃)	>0.1MPa	0.8MPa
拉伸强度	>0.2MPa	2.0MPa
断裂伸长率		800%
拉伸黏结强度	—	1.0MPa
黏结拉伸断裂伸长率	—	200%
抗渗性能		≥2.0MPa
定伸黏结性	60%无破坏	100%无破坏
浸水定伸黏结性	60%无破坏	100%无破坏
拉伸压缩循环(+30%～−30%)	—	2000 次无破坏
水中冻融循环(−20～25℃拉伸 30%)	—	50 次无破裂
耐老化性(300W,50℃紫外辐照 300h)	—	表面无裂纹(伸长率降低 1%)
耐热性	—	100℃、2h 无流淌
低温柔性	—	−50℃、2h 绕 ϕ25mm 圆棒无裂纹
耐水性	-	浸泡 2400h,无碎块、表面无开花
抗酸、碱、盐侵蚀	—	饱和酸(混合酸)、碱、盐溶液中浸泡 168h 后,拉伸强度保持率≥95%,断裂伸长率保持率≥90%

注：聚氨酯建筑密封胶（JC/T 482—2003）。

② 氯化聚乙烯（CPE）止水管（带）　氯化聚乙烯 CPE 止水管（带），是以氯化聚乙烯树脂为主体材料配以各种助剂和填料，经塑冻、混炼和挤出或压延等工艺而制成。该材料为高弹性高分子化合物，与专用胶黏剂配套使用，在−40～+80℃

范围内性能良好；具有抗拉、抗撕裂强度高，延伸率大；抗渗透性、抗穿孔性强，耐腐蚀、耐酸碱、耐臭氧、耐油性、耐候性、耐老化性以及阻燃性优良等特性；对地基冻胀或沉降、混凝土伸缩变形的适应能力强；而且重量轻，黏结性能好，可冷施工操作，工序简单，劳动强度小，工效高，造价低。经检测，材料性能符合国家标准（GB 12953）《氯化聚乙烯防水卷材》中Ⅰ型合格品级的要求。

氯化聚乙烯（CPE）止水管（带）及其配套材料的规格见表5-45，技术性能指标见表5-46。

表5-45 氯化聚乙烯（CPE）止水管（带）及其配套材料的规格

材料名称	用途	规格	备注
止水带	止水主体	厚度：1.2～2.0mm 宽度：120～250mm 长度：30m/卷	可按现浇或预制施工方法采用不同形式止水带
止水管	止水主体	外径：11～22mm 壁厚：1.5～3.0mm 长度：50m/卷	按缝宽选用
胶黏剂	粘贴卷材和粘接卷材之间的接头	专用胶黏剂5kg/桶	若要加速固化，可掺入胶黏剂重量10%的列可钠。胶黏剂用量：0.7kg/m²

表5-46 氯化聚乙烯（CPE）止水管（带）的技术性能指标

项目	性能指标
外观质量	无气泡、疤痕、裂纹、黏结和孔洞
拉伸强度	不小于5.0MPa
断裂伸长率	不小于100%
热处理尺寸变化率	不大于3.0%
低温弯折性	-40℃无裂纹
抗渗透性	0.2MPa、24h不渗水
抗穿孔性	不渗水
剪切状态下的黏合性	不小于2.0N/mm

项目		性能指标
热老化处理	拉伸强度变化率	+50% -20%
	断裂伸长率变化率	+50% -30%
	低温弯折性	-20℃无裂纹
模拟气候	拉伸强度变化率	+50% -20%
	断裂伸长率变化率	+50% -30%
	低温弯折性	-20℃无裂纹
水溶液处理	拉伸强度变化率	±30%
	断裂伸长率变化率	±30%
	低温弯折性	-20℃无裂纹

5.6.5 沥青混凝土防渗

5.6.5.1 沥青材料防渗的特点与适用条件

沥青材料防渗分为沥青薄膜类防渗（包括沥青薄膜、沥青席、沥青砂浆）和沥青混凝土防渗两种，均利用了沥青良好的胶结能力和不透水性。工程实践中常将沥青与矿物质材料拌和均匀，配成沥青混合料。其中粒径大于2.5mm的矿料称为粗骨料，粒径为0.074～2.5mm的矿料称为细骨料，粒径小于0.074mm的矿料称为

填料。

沥青材料防渗的主要优点是：①防渗效果好，适应变形能力强（原西北水科所与青海省水科所的实验表明，在最低气温－30～－7℃，最大冻胀量 79mm 的情况下，沥青混凝土防渗层的裂缝率仅为水泥混凝土的 1/17）；②耐久性好，具有抗碱类腐蚀的能力，一般可使用 10～30 年；③造价低，沥青混凝土防渗层的造价仅为水泥混凝土防渗的 70%；容易修补，便于运输和机械化施工。故沥青混凝土防渗适用于冻害地区，且附近有沥青料源的渠道。

5.6.5.2　沥青混凝土防渗的技术要求

防渗层沥青混凝土的要求主要为以下几点。

① 渗透系数不大于 1×10^{-7}cm/s　沥青混凝土的渗透系数一般为 1×10^{-7}～1×10^{-10}cm/s，平均为 1×10^{-8}cm/s，可以认为是不透水的，一般设计中要求其渗透系数不大于 1×10^{-7}cm/s。

② 孔隙率不大于 4%　试验资料表明，沥青混凝土防渗能力与孔隙率密切相关，孔隙率愈大，密实度愈差，当孔隙率达到 8%时，渗透系数为 1×10^{-7}～1×10^{-6}cm/s。实践表明：沥青混凝土密实度达到 96%，就会有沥青沿边坡蠕动的危险，故要求其孔隙率不大于 4%。

③ 斜坡流淌值小于 0.8mm。

④ 水稳定系数大于 0.9。

$$\text{水稳定系数}=\frac{\text{真空饱水后沥青混凝土抗压强度}}{\text{未浸水的沥青混凝土抗压强度}}$$

⑤ 低温下不得开裂。

不同部位，不同用途沥青混凝土的技术要求详见表 5-47。

表 5-47　水工沥青混凝土主要技术要求

项 目	碾压式沥青混凝土面板			碾压式心墙	浇筑式面板或心墙
	防渗层	整平胶结层	排水层		
孔隙率/%	2～4	－		2～4	—
渗透系数/(mm/s)	$<1\times10^{-6}$	10^{-2}～10^{-3}	>0.1	$<1\times10^{-6}$	$<1\times10^{-6}$
水稳定性系数(或残留稳定度)	>0.85			>0.85	>0.85
热稳定性系数	-	<4.5	<4.5		
斜坡流淌值/10^{-1}mm	<8	—			
其他性质	满足设计要求的强度、柔性、低温不开裂			满足力学性质和柔性	抗流变性好混合料不分离
沥青含量/%	7.5～9.0	4.0～6.0	3.0～5.0	6.0～7.5	10.0～16.0

5.6.5.3　沥青混凝土的组成材料

沥青混凝土是以沥青为胶凝材料与矿粉、矿物骨料（碎石和砂料），经加热、

拌和、压实而成的具有一定强度的防渗材料。

（1）沥青

沥青是沥青混凝土的胶凝材料，应具有良好的不透水性、稳定性、柔性和黏结强度等，具体要求详见表5-48和表5-49。

表5-48 道路石油沥青、建筑石油沥青和普通石油沥青技术标准

质量指标	（中、轻交通）道路石油沥青（GB 50092—96）							建筑石油沥青（GB 494—98）		
	A—200	A—180	A—140	A—100甲	A—100乙	A—60甲	A—60乙	40	30	10
针入度(25℃,100g,5s)/10^{-1}mm	200～300	160～200	120～160	90～120	80～120	50～80	40～80	36～50	25～40	10～25
延度(25℃)/cm ≥	—	100	100	90	60	70	40	3.5	3	1.5
软化点(环球法)/℃ ≥	30～45	35～45	38～48	42～52	42～52	45～55	45～55	60	70	95
溶解度(三氯乙烯、四氯化碳或苯)/% ≥	99	99	99	99	99	99	99	99.5	99.5	99.5
蒸发损失(163℃,5h)/% ≥	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
蒸发后针入度比(163℃,5h)/% ≥	50	60	60	65	65	70	70	65	65	65
闪点(开口法)/℃≥	180	200	230	230	230	230	230	230	230	230

注：当25℃延度达不到100cm时，如15℃延度不小于100cm，也认为是合格的。

表5-49 重交通量道路石油沥青质量要求（GB 50092—96）

质量指标		AH-130	AH-110	AH-90	AH-70	AH-50
针入度(25℃,100g,5s)/10^{-1}mm		120～140	100～120	80～100	60～80	40～60
延度(50mm/min,15℃)/cm		＞100	＞100	＞100	＞100	＞80
软化点(环球法)/℃		40～50	41～51	42～52	44～54	45～55
闪点(开口法)/℃		＞230				
含蜡量(蒸馏法)/%		≤3				
密度(15℃)/(g/cm³)		实测记录				
溶解度(三氯乙烯)/%		＞99.0				
薄膜加热试验(163℃,5h)	质量损失/%	＜1.3	＜1.2	＜1.0	＜0.8	＜0.6
	针入度比/%	＞45	＞48	＞50	＞55	＞58
	延度(25℃)/cm	＞75	＞75	＞75	＞50	＞40
	延度(15℃)/cm	实测记录				

注 1. 有条件时，应测定沥青60℃动力黏度，(Pa·s)、135℃运动黏度，mm²/s，并在检验报告中注明。

2. 如有需要，用户可对薄膜加热试验后的延度（15℃）及密度等指标向供方提出要求。

沥青混凝土所用沥青材料，应根据气候条件、建筑物工作条件、沥青种类和施工方法等来选择。对于气候较热的地区，受荷载较大的建筑物，细粒或砂粒式（10mm 或 5mm）的混合料，应选用标号较低的沥青；反之，则选用标号较高的沥青。一般较重要的工程宜采用 AH-70 或 AH-90 重交通量道路石油沥青；封闭层宜用 AH-50 道路石油沥青；整平层沥青质量标准则可适当放宽。

（2）矿料（粗、细骨料）

沥青混凝土矿料应质地坚硬、密实、清洁、有害杂质少、级配良好，并与沥青材料有较好的黏结性，具体有如下几方面的要求。

① 石料　由于酸性石料（花岗石类）与沥青的黏结性差，故应选用碱性石料，如石灰岩、白云岩等。同时，石料应尽量选用碎石，以增加黏结力。石料的技术要求见表 5-50。

表 5-50　石料的技术要求

项　目	质地坚硬性	吸水率/%	密度/(g/cm³)	含泥量/%	有机质含量/%	硫酸钠法干湿循环5次重量损失/%	与沥青的黏结力等级
技术指标	铺筑中不破碎	≤3.0	≥2.5	≤0.5	无	<12.0	4 级以上

② 砂料　砂料可选用河砂、山砂、海砂或人工砂。其含泥量不得大于 2%（河砂、山砂）～5%（人工砂），坚固性试验合格，水稳定性等级不低于 4 级。

③ 矿粉　矿粉又称填料，是粒径小于 0.074mm 的矿料，要求 0.074mm 筛通过率不小于 75%，亲水性系数小于 1.0。所谓亲水性系数指将等量的填料分别放入水中和煤油中，充分搅拌后让其沉淀，测定填料在水中的沉淀体积 $V_{水}$ 和在煤油中的沉淀体积 $V_{油}$，亲水性系数 $=V_{水}/V_{油}$。矿粉的技术要求见表 5-51。

表 5-51　矿粉的技术要求

项　目	通过率/%			含水量/%	亲水系数	含泥量/%
	0.60mm	0.15mm	0.074mm			
技术指标	100	>90	>70	<0.5	≤1.0	不含

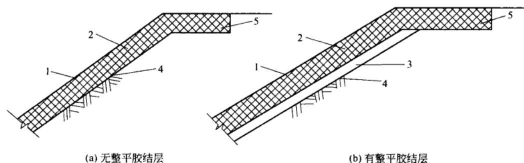
5.6.5.4　沥青混凝土防渗体设计

（1）防渗体结构类型

沥青混凝土防渗体分有、无整平胶结层两种，如图 5-31 所示。一般岩石地基的渠道才考虑使用整平胶结层。为提高沥青混凝土的防渗效果，防止沥青老化，在沥青表面涂刷沥青玛琋脂封闭层。涂刷的沥青玛琋脂，必须满足在高温下不流淌，在低温下不脆裂，具有较好的热稳定性和变形性能。

（2）防渗体厚度

① 封闭层用沥青玛琋脂涂刷，厚度为 2～3mm。沥青玛琋脂应满足高温下不



(a) 无整平胶结层　　(b) 有整平胶结层

图 5-31　沥青混凝土渠道防渗体的结构类型

1—封闭层；2—防渗层；3—整平胶结层；4—土(石)渠基；5—封顶板

流淌、低温下不脆裂的要求。

② 沥青混凝土防渗层一般为等厚断面，其厚度一般为 5～6cm。大型渠道可用 8～10cm。有抗冻要求的地区，渠坡防渗层也可采用上薄下厚的断面，一般坡顶厚度为 5～6cm，坡底厚度为 8～10cm。

③ 整平胶结层采用等厚断面，其厚度宜按能填平岩石基面的原则确定。

④ 沥青混凝土预制板的边长不宜大于 1.0m；厚度采用 5～8cm，容重采用 2.2～2.3g/cm³。预制板一般用沥青砂浆或沥青玛琋脂砌筑；在地基有较大变形时，也可采用焦油塑料胶泥填筑。

5.6.5.5　防渗体施工

沥青混凝土衬砌正式施工前，必须首先进行试铺筑，以确定沥青混合料的配合比，摊铺厚度，施工温度，碾压遍数等工艺参数，施工温度控制标准见表 5-52。

表 5-52　防渗层施工温度控制标准

施工项目	沥青脱水及加热	粗细骨料加热	混合料拌和	摊铺	开始压实	终止压实
温度控制标准/℃	160±10	<180	160～180	130～150	120～140	85～120

注：整平胶结层压实的温度可较防渗层降低 20℃。

沥青混凝土施工工序是：铺筑整平胶结层→铺筑防渗层→涂刷封闭层。碾压是沥青混凝土衬砌施工的关键环节，按选定的摊铺厚度均匀摊铺后，先静压 1～2 遍，再振动压实。压实渠坡时，上行振动，下行静压。压实过程应严格控制施工温度和碾压遍数。

5.6.6　膜料防渗

5.6.6.1　膜料防渗的特点与适用条件

膜料防渗是用塑料薄膜、沥青玻璃纤维布油毡或复合土工膜作防渗层，其上设保护层的防渗方法。它具有下列突出的优点。

① 防渗性能好　膜料防渗可减少渗漏损失 90%～95%。1964 年山东省打渔张灌区实验表明，以搭接法接缝可以减少渗漏量 86.4%；1965 年北京市东北旺灌区试验，焊接接头可减少渗漏量 93%～94%，折叠接头减少渗漏 89%。

② 适应变形能力强　土工膜具有良好的塑性、低温柔性、延展变形和抗拉能力，故不仅适用于不同形状的渠道断面，而且适应于可能发生沉陷和冻胀变形的渠道。实践表明，膜料防渗渠道无论是在冻深 20cm 的地区，还是冻深达 85cm 的地区，都是成功的。

③ 质轻、量小、运输方便。

④ 施工简便，易于推广。

⑤ 造价低　据不同地区的几项工程核算，土保护层塑料薄膜防渗渠道造价仅为混凝土防渗的 1/10～1/5，为浆砌石防渗的 1/10～1/4。即使采用混凝土板作保护层，由于砼板较作为防渗层的砼板薄，其总造价仍不会高于混凝土防渗渠道。

⑥ 具有足够的使用寿命　表 5-53 给出了我国一些早期使用膜料防渗的工程实例，这些早期工程已安全运行了 30 年以上，说明只要设计合理，精心施工，埋藏式膜料防渗工程达到经济使用年限（20～50 年）不成问题。

表 5-53　塑膜防渗运用中的性能变化

工程或部门	测试年份	膜料厚度/mm	抗拉强度/MPa		伸长率/%		备注
			纵向	横向	纵向	横向	
山东打渔张灌区	1964		24.0	20.1	254	276	出厂时测定
	1980		38.35	34.4	182.9	213.2	运用 15 年后
	1990		39.74	35.3	145.5	153.3	运用 25 年后
北京东北旺农场	1965	0.12～0.15	24.43	18.87	224	261.3	埋设前
	1983		33.2	32.6	10～180	8～40	运用 18 年后
	1965	0.14～0.15	24.27	18.1	264	261.3	埋设前
	1983		33.2	27.1	4～40	4～8	运用 18 年后
山西浑源灌区	1965	0.12～0.17	20.0	20.0	≥200	≥200	出厂时
	1979		25.88	26.13	133.5	125	运用 13 年后
陕北织女渠		0.06～0.28	12.4～25.3		210～250		埋设前
			19.1		192		运用 7 年后
水利水电科学研究院	1958	1.2～1.5	14.07		534		试样埋在混凝土雾室存放 10～26 年后取出暴晒 27 个月，经历 31 年后实测
	1990		8.67～9.38		330～380		
纳米比亚某蓄水池尾矿坝	1996		19.69		311		埋设前
	1983		11.31		277		运用 18 年在水池周边取样
	1983		18.67		262		运用 18 年蓄工业废水坝中取样

5.6.6.2 **膜料防渗材料**

膜料防渗多采用埋铺式，其结构一般包括膜料防渗层、过渡层和保护层等，选用材料应符合相应的要求。

(1) 防渗膜料

防渗膜料应具有良好的防渗性、变形能力和强度，能够适应环境水温与气温的变化，具有较大的膜面摩擦系数和幅宽，从而节约投资、提高防渗效果、减小施工中的损坏率。选用膜料时，应结合工程实际，考虑膜料的性能、价格、产品质量、工程中的应用经验等。目前，国内渠道防渗方面应用较多的膜料主要有聚合物类膜料、沥青类膜料和复合土工膜三大类。另外，钠基膨润土防水毯（GCL）也开始试验应用于渠道防渗工程。

① 聚合物类膜料　聚合物类膜料是以高分子聚合物为基本原料的防水阻隔型材料，具有防渗性好、比重较小、延伸性较强、适应变形能力高、耐腐蚀等优点，是目前发展极为迅速的一类合成高分子柔性材料。渠道防渗通常采用聚乙烯(PE)、聚氯乙烯（PVC）及其改性塑料薄膜作为防渗材料（简称塑膜），其物理力学性能应符合表5-54的规定。聚乙烯薄膜可用于－50℃以下，而聚氯乙烯薄膜只能用于－15℃以下，前者适用的低温范围大，故在寒冷地区应优先选用聚乙烯膜料。但聚乙烯膜料抗拉强度低于聚氯乙烯，故在芦苇等植物丛生的地区，宜优先选用聚氯乙烯膜料。

表5-54　塑膜的质量要求

项　目	聚乙烯	聚氯乙烯
密度/(kg/m³)	≥900	1250～1350
断裂拉伸强度/MPa	≥12	纵不小于15,横不小于13
断裂伸长率/%	≥300	纵不小于220,横不小于200
撕裂强度/(kN/m)	≥40	≥40
渗透系数/(cm/s)	$<10^{-11}$	$<10^{-11}$
低温弯折性	－35℃无裂纹	－20℃无裂纹
－70℃低温冲击脆化性能	通过	—

② 沥青类膜料　沥青类膜料是将改性沥青或沥青玛𤧛脂均匀涂于玻璃纤维布上压制而成，它克服了纸胎油毡抗拉强度低的缺点，提高了适应冻胀变形的能力，与塑膜相比其抗老化、抗裂、抗穿透能力强，但运输量大，造价稍高。厚度宜为0.60～0.65mm。采用沥青玻璃纤维布油毡（简称油毡）作为防渗材料时，应厚度均匀，无漏涂、划痕、折裂、气泡及针孔，在气温0～40℃下易于展开，其物理力学性能应符合表5-55的规定；采用弹性体改性沥青防水卷材（SBS)、塑性体改性沥青防水卷材（APP）等多种类型的改性沥青及高分子防水卷材时，其性能应符合国家现行有关技术标准的规定。

表 5-55　油毡的质量要求

项　　目	技术指标
单位面积涂盖材料重量/(g/m²)	≥500
不透水性(动水压法,保持 15min)/MPa	≥0.3
吸水性(24h,18℃±2℃)/(g/100cm²)	≤0.1
耐热度(80℃,加热 5h)	涂盖无滑动,不起泡
抗剥离性(剥离面积)	≤2/3
柔度(0℃下,绕直径 20mm 圆棒)	无裂纹
拉力(18℃±2℃下的纵向拉力)/(kgf/2.5cm)	≥54.0

③ 复合土工膜　复合土工膜是将土工织物与塑料薄膜复合压制而成。土工织物具有较高的抗拉强度和延伸性，它与塑料薄膜复合在一起，不仅增大了塑料薄膜的抗拉强度和抗穿刺能力，而且由于土工织物表面粗糙，增大了接触面的摩擦系数，有利于复合土工膜及保护层的稳定。另外，土工织物还具有排水作用，可以排出膜后的渗透水，防止膜被水和气抬起而失稳。因此，复合土工膜已成为较塑料薄膜更理想的防渗材料。

复合土工膜可分为一布一膜、二布一膜等，其规格主要以成品幅宽、单位面积质量和膜材厚度表示，一般规格系列如下：

幅宽（m）：2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0 等；

单位面积质量（g/m²）：200、300、400、500、600 等；

膜材厚度（mm）：0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.5、0.6 等。

复合土工膜的质量要求应符合表 5-56 的规定。

表 5-56　复合土工膜的质量要求

项　　目		指　　标							
标称断裂强度/(kN/m)		5	7.5	10	12	14	16	18	20
纵横向断裂强度/(kN/m)	≥	5.0	7.5	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0
纵横向标准强度对应伸长率/%		30～100							
CBR 顶破强力/kN	≥	1.1	1.5	1.9	2.2	2.5	2.8	3.0	3.2
纵横向撕破强力/kN	≥	0.15	0.25	0.32	0.40	0.48	0.56	0.62	0.70
剥离强度/(N/cm)	≥	6							
渗透系数/(cm/s)	<	10^{-11}							
幅宽偏差/%		−1							

注：实际规格（标称断裂强度）介于表中相邻规格之间时，按内插法计算相应考核指标；规格超出表中范围时，由供需双方协商确定。

④ 膨润土防水毯（GCL）　钠基膨润土防水毯是一种新型的土工合成材料，主要分为针刺法钠基膨润土防水毯、针刺覆膜法钠基膨润土防水毯和胶粘法钠基膨润土防水毯。针刺法钠基膨润土防水毯，是由两层土工布包裹钠基膨润土颗粒针刺而成的毯状材料，表示代号为 GCL-NP；针刺覆膜法钠基膨润土防水毯，是在针刺法钠基膨润土防水毯的非织造土工布外表面上复合一层高密度聚乙烯薄膜，表示代号

为 GCL-OF；胶黏法钠基膨润土防水毯，是用黏合剂把膨润土颗粒黏结到非织造土工布或高密度聚乙烯板上，压缩生产出的一种钠基膨润土防水毯，表示代号为 GCL-AH。

钠基膨润土防水毯（GCL）用作渠道防渗材料时，应表面平整，厚度均匀，无破洞、破边，无残留断针，针刺均匀，使用的膨润土应为钠基膨润土，粒径在 0.2～2mm 范围内的膨润土颗粒质量至少占膨润土总质量的 80%，其物理力学性能应符合表 5-57 的规定。

表 5-57 钠基膨润土防水毯的物理力学性能

项目		技术指标		
		GCL-NP	GCL-OF	GCL-AH
单位面积质量(g/m^2)	天然钠基	≥3800	≥3800	≥3800
	人工钠化	≥4800	≥4800	≥4800
膨润土膨胀指数/(mL/2g)		≥24	≥24	≥24
吸蓝量/(g/100g)		≥30	≥30	≥30
拉伸强度/(N/100mm)		≥600	≥700	≥600
最大负荷下伸长率/%		≥10	≥10	≥8
剥离强度/(N/100mm)	非织造布与编织布	≥40	≥40	—
	PE 膜与非织造布	—	≥30	—
渗透系数/(mm/s)		$\leqslant 5.0\times10^{-11}$	$\leqslant 5.0\times10^{-12}$	$\leqslant 1.0\times10^{-12}$
耐静水压		0.4MPa，1h，无渗漏	0.6MPa，1h，无渗漏	0.6MPa，1h，无渗漏
滤失量/mL		≤18	≤18	≤18
膨润土耐久性/(mL/2g)		≥20	≥20	≥20

（2）过渡层材料

过渡层是为保护膜料不被渠基和保护层损伤而设置的，分膜下过渡层和膜上过渡层。一般土渠基不设膜下过渡层，岩石和砂砾石渠基应设膜下过渡层；采用黏性土、灰土、水泥土作保护层时一般不设膜上过渡层，采用砂砾石、石料、现浇碎石混凝土或预制混凝土板作保护层时应设膜上过渡层；采用复合土工膜作防渗层时，土工织物侧一般可不设过渡层。用作过渡层的材料很多，包括土、灰土、水泥土、砂和砂浆等，其中水泥、砂料以及拌制砂浆用水的质量要求与混凝土相同，土、灰土和水泥土的性能要求应符合表 5-58 的规定。

（3）保护层材料

土、水泥土、砂砾、石料和混凝土均可作为膜料防渗的保护层。用土料作保护层时应满足表 5-58 的要求；砂砾料用作保护层时，砂砾料的最大粒径宜为 75～150mm；石料和混凝土用作保护层时，其材料的质量要求参见本章前面所述的有关内容。

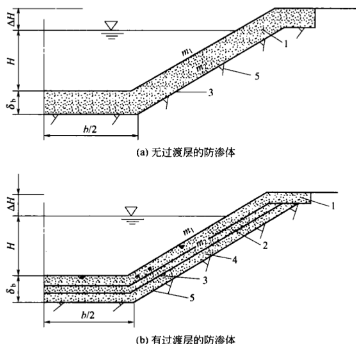
5.6.6.3 膜料防渗结构形式

膜料铺衬有明铺式和埋铺式两种，为了延长膜料使用寿命，保证其防渗效果应

表 5-58 土料的性能要求

项目	用途		
	土料保护层及过渡层	灰土过渡层	水泥土过渡层
黏粒含量/%	3～30	15～30	8～12
砂粒含量/%	10～60	10～60	50～80
塑性指数 I_P	1～17	7～17	
土料最大粒径/mm	<5	<5	<5
有机质含量/%		<1.0	<2.0
可溶盐含量/%	<32.0	<2.0	<2.5
钙质结核、树根、草根含量	不含	不含	不含

采用埋铺式，其构造如图 5-32 所示，一般由膜料防渗层、上下过渡层和保护层组成。其中下过渡层亦称下垫层，其作用在于防止基础面不平整或有粗粒料时对膜料层的破坏；膜料层主要起防渗作用；上过渡层，在于防止保护层材料对膜料的破坏；保护层主要在于防止紫外线照射等引起膜料的老化，防止外力对膜料的破坏，在寒冷地区兼作保温层，不使膜料遭受低温冻害作用。根据渠基和保护层材料不同，可设过渡层也可不设过渡层。无过渡层防渗体适用于土渠基和用素土、水泥土作保护层的防渗工程；有过渡层防渗体适用于岩石、砂砾石渠基，和用石料、砂砾石、现浇碎石混凝土或预制混凝土作保护层的防渗工程。采用复合土工膜时，可不



(a) 无过渡层的防渗体

(b) 有过渡层的防渗体

图 5-32 埋铺式膜料防渗体的构造

1—水泥素土、土或混凝土、石料、砂砾石保护层；2—过渡层；3—膜料防渗层；
4—过渡层（土渠基时不设此层）；5—土渠基或岩石、砂砾石渠基

单独设过渡层。

5.6.6.4 保护层设计

（1）保护层厚度

土、水泥土、砂砾、石料和混凝土均可作为膜料防渗的保护层。保护层材料应根据渠道流速大小和当地材料来源加以选择，一般作成素土夯实保护层或刚性材料保护层。

素土保护层的抗冲刷性能差，允许流速应较土渠的不冲流速低10%～20%，适用于平原地区流速不大的渠道。在弯道和渠系建筑物（跌水、陡坡、桥、闸等）上下游，由于渠水流态、流速变化，对土保护层冲刷破坏很大，需采取加固措施，如改用混凝土、砌石等刚性材料保护层。素土保护层的厚度可按表5-59选用。

表5-59 素土保护层的厚度 单位：cm

保护层土质	渠道设计流量/(m^3/s)			
	<2	2～5	5～20	>20
砂壤土、轻壤土	45～50	50～60	60～70	70～75
中壤土	40～45	45～55	55～60	60～65
重壤土、黏土	35～40	40～50	50～55	55～60

水泥土、石料、砂砾料和混凝土等刚性材料保护层抗冲能力强，如干砌卵石直径为10～15cm时允许流速为2～2.5m/s，直径30～35cm的允许流速为4～4.5m/s，适用于流速较大的山区、前山区的渠道和大型渠道。保护层的厚度，可按表5-60选用。也可在渠底、渠坡或不同渠段，采用具有不同抗冲能力、不同材料的组合式保护层。

表5-60 刚性材料保护层厚度 单位：cm

保护层材料	水泥土	块石、卵石	砂砾石	石板	混凝土	
					现浇	预制
保护层厚度/cm	4～6	20～30	25～40	≥3	4～10	4～8

（2）保护层边坡稳定分析

由于膜料的防渗隔水作用，使得上过渡层与膜面间往往存在薄层水膜，使其抗剪强度指标（C、φ值）降低，致使边坡稳定性下降。因此，对于大、中型渠道土保护层的边坡系数应通过稳定分析来确定。

① 基本假定

a. 土保护层失稳时，假定沿图5-33所示的$abcd$线滑动，对黏性土ab、bc为直线，cd为弧线；对非黏性土ab、bc及cd为直线。c点为最小安全系数时，降落后水位的水平延长线与膜层的交点，通过试算决定。

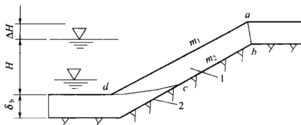


图 5-33　土保护层失稳示意图

1—素土保护层；2—膜料防渗层

b. 土保护层边坡稳定分析的控制时期为渠水位骤降期。

c. 采用简化法计算渗透压力即最高水位以上的土重按湿容重计算；计算滑动力时，最高水位至骤降后水位间的土重按饱和容重计算，骤降水位以下的土重按浮容重计算；计算抗滑动力时，最高水位以下的土重均按浮容重计算。

② 计算方法

采用简化简布法（图 5-34），亦称圆弧普遍分条法，它适用于土石坝或坝基中存在软弱夹层，出现直线和曲线组成的非圆孤滑动面的情况。因土保护层与膜料间类似软弱夹层，所以采用此法比较合理。其分析计算公式如下：

$$F_s=\frac{\sum(c_i b+W_i' t g\varphi_i)\dfrac{\sec^2\alpha_i}{1+\mathrm{tg}\varphi_i\,\mathrm{tg}\alpha_i/F_s}}{\sum W_i''\mathrm{tg}\alpha_i} \tag{5-43}$$

或

$$F_s=\frac{\sum[c_i b_i+b_i(h_{i1}\rho+h_{i2}\rho'+h_{i3}\rho')\mathrm{tg}\varphi_i]\dfrac{\sec^2\alpha_i}{1+\mathrm{tg}\varphi_i\,\mathrm{tg}\alpha_i/F_s}}{\sum b_i(h_{i1}\rho+h_{i2}\rho_m+h_{i3}\rho')\mathrm{tg}\alpha_i} \tag{5-44}$$

式中　b_i——土条分条的宽度，m，$b_i=L_i\cos\alpha_i$；

α_i——N_i 与铅垂线的夹角，(°)；

φ_i——滑动面上土或土与膜料间的内摩擦角，(°)；

c_i——滑动面上土或土与膜料间的凝聚力，MPa；

W_i'——按湿容重和浮容重计算的土条重量，kg；

W_i''——按湿容重、饱和容重和浮容重计算的土条重量，kg；

F_s——边坡稳定安全系数；

L_i——土条分条的顶底斜长，m；

ρ、ρ'、ρ_m——土条的湿容重、浮容重和饱和容重，kg/m^3；

h_{i1}、h_{i2}、h_{i3}——相应于 ρ、ρ'、ρ_m的水深，m。

③ 抗剪强度指标（φ、C 值）的选用

a. φ、C 值的选用，应与采用有效应力法，或总应力法的计算方法相对应。即采用有效应力法简化简布法计算时，应采用有效应力情况下实测的 φ、C 值（采用直剪仪试验时，应采用饱和慢剪法测定；采用三轴仪试验时，应采用饱和不排水剪

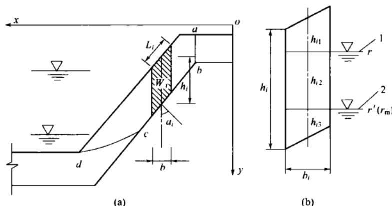


图 5-34　简化简布法计算图

法，同时测孔隙水压力，确定有效应力下的 C、φ 值）；如采用总应力法计算时，应采用总应力下实测的 C、φ 值（用直剪仪试验时，采用饱和快剪法测定；用三轴仪试验时，采用饱和不排水剪法测定）。

b. 计算中，滑动面的 ab 和 cd 段应采用纯土的 C、φ 值；在 bc 段应采用土与膜料之间的 C、φ 值。因 ab 段很小，且土体在滑动前，往往先在 ab 处产生裂缝，所以计算时，略去 ab 段的抗滑力。

c. 土与膜料之间 C、φ 值的测定方法

直剪仪试验法：可将膜料夹在剪切面部位，在相应设计条件下，采用前述相应方法试验。

三轴仪试验法：根据不同土质和不同容重可按表 5-61 选用膜料在试样中近似的置放夹角（α）。将膜料放入试样中，在相应容重及方法下测定 C、φ 值。因在极限平衡条件下，$\alpha=45°+\varphi/2$。因此，如采用近似 α 角求得的 φ 值与前式相差过大时，可改变 α 角，重新试验和测定 C、φ 值。

表 5-61　膜料在三轴试验试样中的夹角（α）　　单位：(°)

土壤类别	土壤干容重/(g/cm³)		
	1.35	1.5	1.7
砂壤土	52	55	56
壤土	46	47	48
黏土	45	46	47

小型渠道无条件进行计算时，土保护层膜料防渗渠道的最小边坡系数，可按表 5-62 参考选用；砌石、混凝土、水泥土等刚性材料保护层的最小边坡系数可参考表 5-63 选用。

5.6.6.5　防渗层设计

（1）铺膜范围及铺膜高度

表 5-62 土保护层膜料防渗渠道的最小边坡系数

保护层土质类别	渠道设计流量/(m^3/s)			
	<2	2～5	5～20	>20
黏土、重壤土、中壤土	1.50	1.50～1.75	1.75～2.00	2.25
轻壤土	1.50	1.75～2.00	2.00～2.25	2.25
砂壤土	1.75	2.00～2.25	2.25～2.50	2.75

表 5-63 刚性材料保护层膜料防渗渠道最小边坡系数

保护层材料类别	渠基土质类别	渠道设计水深/m											
		<1			1～2			2～3			>3		
		挖方	填方		挖方	填方		挖方	填方		挖方	填方	
		内坡	内坡	外坡	内坡	内坡	外坡	内坡	内坡	外坡	内坡	内坡	外坡
以混凝土、砌石、水泥土、灰土、三合土、四合土作为保护层的膜料防渗	稍胶结的卵石	0.75	—	—1.00	—	—	—1.25	—	1.50	—	—		
	夹砂卵石沙土	1.00	—	—1.25	—	—1.50	—	—	1.75	—	—		
	黏土、重、中壤土	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.00	1.50	1.50	1.25
	轻壤土	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50	1.50
	砂壤土	1.25	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.75	1.75	1.50

膜料防渗渠道的铺膜范围有全铺式［图 5-35（a）～（e）］、半铺式［图 5-35（f）］和底铺式［图 5-35（g）］三种。全铺式防渗效果最高，每天平均渗漏率为 0.23%～0.67%，可减少渗漏损失 99.15%～99.71%；半铺式铺膜高度为水深 0.5 倍时，每昼夜平均渗漏率为 6.58%～9.6%，可减少渗漏损失 87%～91.7%，为全铺式防渗效果的 87.7%～90.0%，但可节约很多投资；底铺式可减少渗漏损失 50%左右。如因投资限制，可以采用半铺式或底铺式膜料防渗。

全铺式铺膜高度与水位齐平即可，可不设超高，半铺式铺膜高度则以渠道水深的 1/2～2/3 为宜。

（2）铺膜基槽形式

埋铺式膜料防渗渠道设计的主要任务是保证渠道断面稳定的条件下，最大限度地节约占地、材料或人力。渠道边坡系数、铺膜基槽形式和保护层厚度三者之间互相影响，互相制约。为了增加边坡稳定性，我国渠道防渗工作者提出了多种铺膜基槽形式，可分为如下三种。

① 矩形和梯形　如图 5-35(a)、(b)，在不放缓表面边坡的条件下，加厚了坡脚保护层，提高了渠坡稳定性，膜料用量省，但土方工程量大，适用于芦苇和杂草生长较多的塑膜防渗，也适用于油毡渠道。

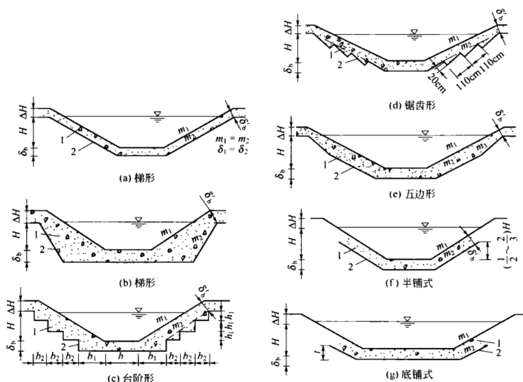


图 5-35　铺膜基槽断面形式

1—素土保护层；2—膜料防渗层

② 锯齿形　将梯形基槽挖成锯齿，边坡稳定性好，不需要减缓边坡，不增加占地，土方量小，但施工麻烦，如图 5-35（d）。适用于断面大，无芦苇生长的塑膜防渗渠道。如 1965 年山东省打渔张灌区四干渠采用锯齿形，在运用中多次停水，水位多次骤降，塑膜保护层未出现裂缝或坍塌。

③ 复式梯形　将梯形基槽边坡挖成台阶，如图 5-35（c）、（e）所示。北京市东北旺南干渠以素土夯实厚 30cm 作保护层，采用台阶形基槽断面，效果良好。

（3）膜层厚度

膜料层厚度，一般与过度层土料粒径、膜料种类和性能有关，规范规定宜选用厚 0.18～0.22mm 的深色塑膜，小型渠道塑膜厚度不得小于 0.12mm；选用玻璃纤维机制油毡时，其厚度宜为 0.60～0.65mm。

（4）膜层与周边连接设计

① 膜层顶部构造设计　为了固定膜层，防止水流进入膜层下边，膜料层应与周边妥善连接。膜层顶部，宜按图 5-36 铺设。

② 膜层与建筑物连接设计　防渗体与建筑物的连接，应按下列要求设计：膜料防渗体应按图 5-37 用黏结剂与建筑物粘牢；素土保护层与跌水、闸、桥连接时，

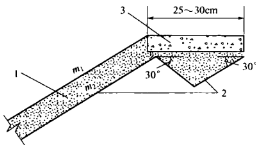


图 5-36　膜层顶部铺设形式

1—保护层；2—膜料防渗层；3—封顶板

应在建筑物上下游改用石料、水泥土、混凝土保护层；水泥土、石料和混凝土保护层与建筑物连接，应按规定设置伸缩缝。

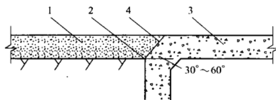


图 5-37　膜料防渗体与建筑物的连接

1—保护层；2—膜料防渗层；3—建筑物；4—膜料与建筑物黏结牢固

5.6.6.6　过渡层设计

过渡层的作用主要是防止基础面的凹凸不平和粗粒料以及保护层材料对膜料层的破坏，土料、水泥土、砂浆和粉砂均可作为膜料防渗工程的过渡层材料，其厚度要求见表 5-64。

表 5-64　过渡层的厚度

过渡层材料	厚　度/cm
灰土、塑性水泥土、砂浆	2～3
素土、砂	3～5

灰土和水泥土抗冻性较差，适宜于温和地区；砂浆则可用作寒冷地区和严寒地区的过渡层；素土和砂层尽管造价低，但容易被水流淘刷，导致保护层和防渗层的破坏。因此，最好用低等级砂浆代替土料作上过渡层。

5.6.6.7　施工要点

膜料防渗的施工顺序为渠道基槽开挖整平、膜料加工及铺衬、保护层回填夯实三大步骤。膜料防渗施工质量的核心问题，是在施工过程中保持膜层的完整和土保护层边坡稳定。

渠基开挖整平后，首先进行灭草处理，灭草剂可选用稳杀得和茅草枯。

膜层连接可采用黏结，焊接及搭接三种方式，黏结及焊接宽度为5～10cm，搭接宽度为10～30cm。铺衬膜料时应根据渠道大小将膜料加工成大幅，自渠道下游向上游，由渠道一岸向另一岸铺设，膜料应留有小褶，并平贴渠基。

保护层的回填，直接影响其稳定和渠道防渗效果。土保护层可用压实法或浸水泡实法填筑，刚性材料保护层的施工方法与相同材料防渗层的施工方法相同。

参 考 文 献

[1] 林性粹等. 旱作物地面灌溉节水技术 [M]. 北京：中国水利水电出版社，1998.
[2] 喷灌工程技术手册编写组. 喷灌工程技术手册 [M]. 北京：中国水利水电出版社，1989.
[3] 李援农等. 保护地灌水技术 [M]. 北京：中国农业出版社，2000.
[4] 马孝义等. 北方旱区节水灌溉技术 [M]. 北京：海潮出版社，1999.
[5] 李龙昌等. 管道输水工程技术 [M]. 北京：中国水利水电出版社，1998.
[6] 李安国等. 渠道防渗工程技术 [M]. 北京：中国水利水电出版社，1998.
[7] 周卫平等. 微灌工程技术 [M]. 北京：中国水利水电出版社，1998.
[8] 水利电力部. 喷灌工程技术规范 [S]. 北京：水利电力出版社，1985.
[9] 水利部农村水利司. 低压管道输水灌溉技术 [M]. 北京：水利电力出版社，1991.
[10] 水利部科技司. 低压管道输水灌溉工程技术规范（SL/T 153—95） [S]. 北京：水利电力出版社，1998.
[11] 陈大雕，林中卉. 喷灌技术 [M]. 北京：科学出版社，1992.
[12] 白丹，魏小抗，王凤翔等. 节水灌溉工程技术 [M]. 西安：陕西科学技术出版社，2001.
[13] 康绍忠，蔡焕杰. 农业水管理学 [M]. 北京：中国农业出版社，1996.
[14] 茆智，李远华，李会昌. 实时灌溉预报 [J]. 中国工程科学，2002，4（5）：24-33.
[15] 李远华. 实时灌溉预报的方法及应用 [J]. 水利学报，1994，2：46-51.
[16] 中华人民共和国水利部. 灌溉与排水工程设计规范（GB 50288—99） [S]. 北京：中国计划出版社，1999.
[17] 冯广志，周福国，季仁保. 渠道防渗、衬砌技术发展中的若干问题与建议 [G]//渠道防渗论文集. 北京：中国水利水电出版社，2003.
[18] 山西省渠道防渗工程技术手册编委会. 山西省渠道防渗工程技术手册 [M]. 太原：山西科学技术出版社，2003.
[19] 李安国. 我国渠道防渗工程技术综述 [J]. 防渗技术，2000（1）：1-4.
[20] 姜开鹏，赵竟成，王晓玲等. 节水灌溉工程实用手册 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.
[21] 岳跃真，郝巨涛，孙志恒等. 水工沥青混凝土防渗技术 [M]. 北京：化学工业出版社，2007.
[22] 周正兵，王钊. 用于渠道防渗的两种新型土工复合材料 [J]. 防渗技术，2001（3）：1-5.
[23] 李亚杰. 建筑材料 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2001.
[24] 冯广志，张展羽，吴玉柏. 渠系改造 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2004.
[25] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范（SL 18—2004） [S]. 北京：中国水利电力出版社，2005.
[26] 中华人民共和国水利部. 节水灌溉工程技术规范（GB/T 50363—2006） [S]. 北京：中国计划出版社，2006.
[27] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程（SL 352—2006） [S]. 北京：中国水利水电出版社，2006.
[28] 中国长江三峡工程开发总公司. 水工沥青混凝土试验规程（DL 5362—2006）[S]. 北京：中国电力出版社，2007.
[29] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M]. 西安：陕西科学技术出版社，1997.
[30] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程边坡设计规范（SL 386—2007）[S].

[31] 张立德，王远超，周小兵等. 沙漠明渠工程设计施工关键技术研究与实践 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2006.

[32] 中华人民共和国水利部. 渠系工程抗冻胀设计规范（SL 23-2006）[S]. 北京：中国水利电力出版社，2007.

[33] 余书超，宋玲，欧阳辉. 冬季输水的混凝土渠道防冻胀破坏的研究 [G] //渠道防渗论文集. 北京：中国水利水电出版社，2003.

第6章　旱地农田提高土壤水分生产率的途径

6.1　旱地农田土壤水分动态

6.1.1　裸地土壤水分动态

在非作物生长季节里，经常有裸地存在。裸地即地表上无农作物等植被覆盖的农业用地，其土壤水分变化状况（包括季节变化和垂直变化），主要受气象因子影响，它能说明在地表上无农作物等植被覆盖情况下旱地农田的土壤水分动态。因此，要确切地了解一个地区旱地土壤水分状况的基本特征及其动态变化规律，就必须进行多年定位动态观测，特别是对缺水年、平水年和丰水年的观测资料进行深入分析，才能获得较为可靠的结论。

6.1.1.1　晋东南裸地土壤水分动态

（1）在山西省屯留县的裸地土壤水分观测表明，本区土壤水分季节变化大致可分为两个时期四个阶段。

① 土壤水分循环的两个时期　土壤水分状况决定于水分收支。屯留地区地下水位比较低，一般在10m以下，所以自然降水是旱地土壤水分的唯一来源。土壤水分的支出受气候诸要素的综合影响，一般用最大蒸发量来表示。因为用彭曼法计算，所以以潜在腾散量粗略地代替裸地最大蒸发量。

如果以P表示降水量，以ET_0表示潜在蒸散量，当$P>ET_0$时，水分有盈余，为气候上的湿润季节，当$P<ET_0$时，水分亏缺，为气候上的干旱季节。根据对屯留县1971～1988年气象资料统计和按联合国粮农组织（FAO，1979）修订的彭曼公式计算结果，本区多年平均降水量为551.3mm，潜在蒸散量为851.2mm，全年水分亏缺量近300mm。

从降水和潜在蒸散量的时间分布曲线（图6-1）看出，二者呈单峰型。潜在蒸散量高峰的出现时间比降水早一个月，前者在6月，后者在7月，而且潜在蒸散时间分布曲线离散程度大，降水时间分布曲线离散程度小，其结果一方面导致干、湿季节明显，另一方面造成湿润季节缩短，干旱季节延长。土壤水分随气候干湿变化而变化，湿润季节土壤水分含量增加，为蓄墒期，干旱季节土壤水分含量减少，为失墒期。同时由于土壤水分状况决定于降水强度和蒸发强度的对比关系，加之本地

区降水量及其季节分配的年际变化很大，所以每年蓄墒期与失墒期转换的时间早晚、持续时间的长短都不相同。根据多年观测结果，屯留地区蓄墒期从 6 月末开始，9 月上旬结束，持续 2 个多月。失墒期从 9 月中旬开始到第二年 6 月下旬结束，长达 9 个多月（图 6-1）。

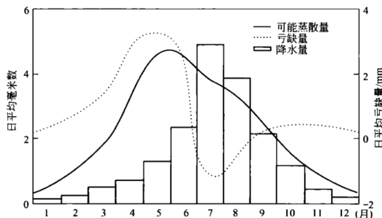


图 6-1　降水量、降水亏缺量、可能蒸散量的时间分布

根据多年观测资料计算分析得出，本区蓄墒期降水量为 297.8mm，占年降水量的 54%；潜在蒸散量为 240.7mm，占年总潜在蒸散量的 28.3%，水分盈余 57.1mm，土壤蓄水量逐渐增加，在本期末达到一年中的最大值，0～200cm 土层储水量为 500～600mm，占田间持水量的 78%～94%。失墒期降水量为 253.5mm，占年降水量 46.0%；潜在蒸散量为 610.5mm，占年总量的 71.7%，水分亏缺 357.0mm，土壤蓄水量逐渐减少，到本期末降到最低，0～200cm 土层储水量为 400～450mm，占田间持水量的 63%～70%。

② 土壤水分循环的四个阶段　根据大气-土壤系统水分循环的特点和土壤水分季节动态变化状况，可将晋东南地区土壤水分循环划分为四个阶段。

一是土壤水分恢复阶段，本阶段与上述蓄墒期相对应，主要包括 7 月、8 月和 9 月上旬。由于这一阶段的降水量大于潜在蒸散量，土壤水分以恢复过程占主导地位，到本阶段末，0～200cm 土层的储水量增加 94～160mm，使土壤含水量接近田间持水量水平。

二是秋季土壤水分缓慢蒸发阶段，本阶段紧接蓄墒期之后至冬前（即 9 月中旬～11 月下旬）。此期间气温明显下降，降水显著减少，但土壤水分仍很活跃，空气湿度大，裸地最大蒸发量略大于同期降水量，土壤水分蒸发缓慢，且一般年份主要在 0～20cm 表层进行。

三是冬季土壤水分相对稳定阶段，本阶段从上年 11 月末到翌年 3 月上旬。这段时间降水量很少，仅占全年降水量的 4%～5%，同时气温低，月平均气温在 0℃以下，土壤冻结，土壤水由液态变为固态。土壤水分总蒸发量等于或略多于同期降

水量，土壤水分处于相对稳定状态。0～60cm 土层的湿度视当年秋雨多寡而定，其变化在田间持水量和田间稳定湿度之间。60cm 以下土层处于接近田间持水量的水平。

四是春季土壤水分大量蒸发阶段，本阶段为 3 月中旬～6 月下旬。此时我国北方处于旱季，降水仍比较少，阶段降水量仅 144.6mm，占年降水量的 26.2%。但此时气温升高迅速，空气相对湿度低，地面蒸发强烈，同期潜在蒸发量高达 414.9mm，为同期降水量的 2.9 倍，形成了“气象干旱”。本阶段初期土壤返浆，表层湿度很大，但处在上述气象条件下，土壤水极易上移蒸发而消耗，土壤含水量不断下降，到本阶段末土壤含水量下降到全年的最低点。据实测，此时 0～200cm 土层的储水量为 400～450mm，相当田间持水量 62%～70%。

(2) 土壤水分垂直动态

由于该地区地下水位较深，一般在 10m 以下，土壤水分消耗的主要方式是物理蒸发。根据水分向蒸发表面移动的能力，各土层水量增减状况，湿度变幅大小及水分性质变异等特点，可将土壤水分的垂直变化分为四层。

第一层是土壤水分速变层。为 0～20cm 的耕作层，由于受人为耕作因素的影响较大，土壤团粒结构良好，土壤与大气间的水分交换强度大，土壤水分变化迅速，湿度变化范围大，尤其是在 0～10cm 表层，在雨后可达饱和持水量，而干旱时可降到凋萎湿度以下。

第二层是土壤水分活跃层。为 20～80cm 的土层，土壤水分活动性受天气-气候因素的影响虽比速变层小得多，但仍比较活跃，土壤湿度变化范围仍然较大，在田间持水量与田间稳定湿度之间，具有明显的季节性干湿变化过程，上述土壤水分循环的四个阶段在此层表现最为明显。

第三层是土壤水分过渡层。为 80～180cm 土层，受天气-气候因素的影响很小，土壤水分循环的四个阶段在此层内逐渐消失，只有在春季大量失墒时，土壤含水量才略有下降，至雨季蓄墒期因上层水分下渗而再度增加。此层土壤湿度在易效水范围内变化。

第四层是土壤水分相对稳定层。为 180cm 以下的土层，土壤湿度比较稳定，常年保持在田间持水量或接近田间持水量水平，只有在异常干旱年份才显现出变化。

6.1.1.2 渭北旱原裸地土壤水分动态

渭北旱原位于陕西中部，年平均降水量变化在 550～710mm。该区降水量的季节性差异特别明显，夏秋两季降水量占全年降水量的 70%以上，冬春降水量占 30%。渭北旱原的年蒸发量约 1000mm 左右，远大于年降水量，干燥度为 1.5 左右，气候上属于半湿润偏旱地区。

渭北旱原地下水埋藏深度大都在 50m 土层以下，不易开采。地表水相当贫乏，农业生产主要靠自然降水和土壤供水。其中土壤供水在作物生长中占重要位置。

渭北旱原裸地土壤水分的变化包括季节变化和垂直变化。裸地土壤水分的季节变化情况，据中国科学院西北水土保持研究所多年来的观测，渭北旱原东部台原地区裸地 0～200cm 土层水分的周年动态可分为四个时期。一是土壤水分相对稳定期，由于此期（包括 11、12 和 1、2 四个月）降水稀少，气温低，地面蒸发量小，故土壤水分相对稳定。据测定，此期水分总消耗量为 72.5mm，日平均水分消耗量 0.55mm。二是土壤水分缓慢消耗期，此时期为 3 月上旬～4 月下旬。由于该期气温开始回升，而降水量增加不大，土壤水分损失量有所增加。据测定此时期日平均水分消耗量为 1.22mm，较前期高一倍。同时本阶段前期，土壤解冻，表层含水量较高，毛细管水运行活跃，土壤水蒸发加快，故应及时耙耱整地，抗旱保墒，防止土壤水分无效损耗。三是土壤水分大量损耗期，此期为 5 月上旬～7 月上旬。气温迅速升高，日平均气温可达 22.6℃，地面蒸发量也达到全年最高值。该期虽然降水量也有所增加，但因水分消耗量远大于降水量，到本期末土壤水分总亏缺量可达 208.5mm，日平均水分损耗量达 3.26mm，故应采取各种措施及时中耕保墒。四是土壤水分恢复期，本阶段为 8 月上旬～10 月下旬，包括整个雨季。此时期系全年降水量最多时期，加之气温较前期下降，地面蒸发也较前期小，故降水量比水分消耗量高得多，土壤水分得到恢复，据测定，到本期末土壤水分可增加 179.5mm。

渭北旱原裸地土壤水分的垂直变化规律，据观测可分为三个层次，一是土壤水分活跃层，该层为 0～30cm，系土壤与大气水分交换的媒介，直接受大气条件的影响，该层土壤水分运移迅速，土壤水分变异系数大于 22%。二是土壤水分次活跃层，地表下 30～100cm 土层。此层受大气条件的影响较土壤水分活跃层小，土壤水分变异系数在 16.5%～22.0%之间。三是土壤水分相对稳定层，地表 100cm 以下，此层土壤水分受大气条件影响小，土壤水分相对稳定，土壤水分变化主要受土壤水势的制约，土壤水分变异系数小于 16.5%。但该土层是作物后期生长供水的主要层次，土壤水分的多寡对作物产量的影响很大，故应重视深层土壤水分的贮存。

以上系指一般年份土壤水分的变化而言的，不同水文年份土壤水分的动态变化如图 6-2 所示。从图 6-2 可以看出，干旱年份，土壤水分含量一直处于低水平状态，0～200cm 土层水分含量低于 400mm。丰水年份，除 8～9 月初外均处于高水平状态，0～200cm 土层水分含量高于 400mm，恢复期可达 530mm，接近田间持水量（567.9mm）水平。

表 6-1 列出渭北旱原东部不同水文年份土壤水分动态特征。从表中可以看出，丰水年份 0～200cm 土层水分消耗量比平水年份和干旱年份高，日平均水分消耗量为 1.80mm。丰水年到期末土壤水分不仅恢复到先前的水平，而且有所增加。干旱年，到期末土壤水分不仅未恢复到原来的水平，而且有较大的亏缺，0～200cm 土层亏缺量高达 79.2mm。

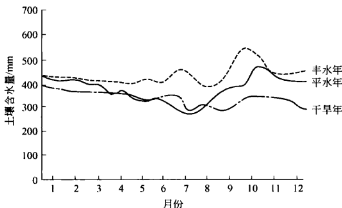


图 6-2 不同水文年份土壤水分动态比较

表 6-1 渭北旱塬东部不同水文年份 0～200cm 土壤水分动态 单位：mm

水文年	丰水年					干旱年				
时段	相对稳定期	缓慢消耗期	大量损耗期	恢复期	总计	相对稳定期	缓慢消耗期	大量损耗期	恢复期	总计
始、末期	456.7～448.8	425.0	403.3	380.2	433.0	345.8～295.7	367.0	330.0	279.8	374.9
土壤含水量	433.0～425.0	403.3	380.2	456.7	448.8	374.9～367.0	330.0	279.8	345.8	295.7
土壤水分亏缺	15.9	21.7	23.1	－76.5	－15.8	58.0	37.0	50.2	－66.0	79.2
降水量	35.3	34.8	281.0	313.5	664.6	22.8	35.6	79.5	185.9	303.8
水分消 耗总量	51.2	56.5	304.1	237.3	658.8	80.8	72.6	129.7	119.9	403.0
日平均水分消耗量	0.39	0.93	3.33	2.97	1.80	0.61	1.19	1.41	1.46	1.10

另外，从图 6-2 中还可以看出，无论何种类型水文年份，在土壤水分恢复后，紧接而来的均有一个土壤水分含量急剧下降的过程，对不同类型年份，该过程的时间长短不同。丰水年和平水年为 1 个月左右。干旱年较长，约 1 个半月左右，因此，在渭北旱塬，雨季过后，无论什么类型水文年份，都应及时作好冬前保墒工作，以利农业生产。

6.1.2 非裸地土壤水分动态

6.1.2.1 冬小麦田土壤水分动态

冬小麦一般在上一年 9～10 月播种，翌年 6 月收获。其生育年按上一年 7 月至次年 6 月计算。冬小麦田土壤水分变化如下（参见图 6-3，图 6-4）。

（1）年内季节分布

作物田土壤的水分变化包括恢复和损耗两种过程。在半湿润偏旱区冬小麦田里，土壤水分的恢复过程集中出现于 7～10 月，也就是集中出现于黄土高原的雨季里。资料表明，不论是在干旱年或丰水年，在这一时段里冬小麦田的土壤水分都能

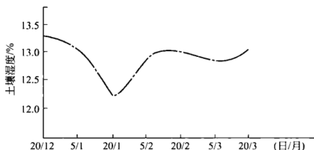


图 6-3　澄城试验区冬季土壤水分动态

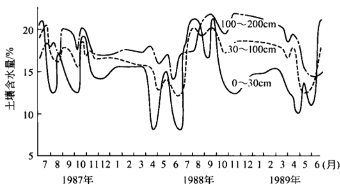


图 6-4　屯留冬小麦农田不同层次土壤水分含量的时间变化

全部恢复或基本恢复。例如，渭北高原洛川的 10 年土壤水分测定结果表明，在这一时段，0～2m 土层的平均湿度可达 19.1%～20.6%（当地田间持水量为 20.2%）。澄城台原在丰水年，0～2m 土层平均湿度达 19.4%～21.0%（当地田间持水量为 21.5%），亦即土壤水分可得到全部恢复，在平水年此土层的土壤水分亦可恢复到田间持水量的 70%～80%。另据山西屯留测定，小麦耗水所形成的干旱土壤，由于得到雨季里降水的补充，其 0～2m 土层内的土壤含水量可以达到和裸地一样的水平。这证明了在半湿润偏旱地区，冬小麦田的土壤水分大都属于年周期完全补偿型。只是在半湿润偏旱台原地区，因降水年际变化大，其土壤水分属于年周期非完全补偿型，而为基本补偿型，一般经过雨季降水补偿后的最大亏缺量为 20%。

在这一区域，冬小麦田土壤水分损耗阶段为 11～6 月，其中以作物生长旺盛期的 3～6 月份的水分亏缺最多。据测定（表 6-2），此期间土壤湿度平均只有 11.5%，占田间持水量值的一半，要比裸地多耗水 64.1～107.7mm。

为了对作物田间土壤水分作更进一步的划分，还需要使用两种定量化指标。一是划分四季气候的标准，按《中国气候区划》划分四季标准，气候平均低于 10℃ 为冬季，气候平均温度在 10～22℃之间为春、秋季，大于 20℃为夏季，几个地区的计算四季划分结果列于表 6-3。二是耗水标准，采用《黄土高原区域治理与评价》

表 6-2 半湿润偏旱地区冬小麦田土壤水分大量亏缺的土壤湿度

测地	测定时间	干土重/%	占田间持水量值/%
屯留	1988-06-24	13.8	59.7
	1988-06-25	13.1	56.6
洛川	1978-05-15	9.6	48.0
	1979-06-29	10.9	54.5
	1980-07-01	13.1	65.5
	1981-06-15	9.6	48.0
	1982-07-15	9.9	49.5
	1983-06-15	12.9	64.5
	1984-07-15	12.0	60.5
	1985-07-01	10.9	54.5
	1986-7-15	10.1	50.5
永寿	1987-05-31	17.3	74.9
	1988-06-20	13.6	58.7
	1989-06-20	11.3	49.0
合阳	1987-05-31	13.4	57.0
	1988-05-31	12.7	54.0
	1989-05-31	12.2	51.9
澄城	1983-05-22	11.3	52.5
	1984-06-22	10.9	50.7
	1985-07-05	10.5	48.8
	1986-06-20	10.7	49.8
	1987-05-20	7.6	35.3
	1988-06-11	10.7	49.8
	1989-05-08	11.3	52.6
	1990-06-13	8.5	39.5
平　　均		11.5	53.0

中制定的统一标准，也就是以日净失水量（即为时段内降水量和蒸发量相抵后的土壤水分减少量，或增水量）在 0.2mm 以下，阶段失水量占年总失水量的 15%以下的时期为相对稳定期；以日净失水量在 0.2～0.6mm 之间，阶段失水量占年总失水量的 15%～30%者为缓慢蒸发期：以日净失水量达到 0.6mm 以上，阶段失水量占总失水量的 30%～70%的时期为强烈损耗期；而土壤水分集中增加且得到补偿的时期为补偿恢复期。根据上述划分标准，可按不同地区冬小麦田的水分变化划分为不同的时期。

台原地区（以澄域、合阳为例）。在这一地区，冬小麦田土壤水分变化可分为以下四个时期。

① 冬季水分交错稳定期　此期出现在 12 月 20 日～2 月 20 日之间。从总体看来，这两个月的日蒸发量只有 0.07mm，且比较稳定。但有时在短时间内会因雨雪或土壤内部水分活动的影响而有较大变化，在这种情况下，日蒸发量最大可达 1.41mm，日恢复量最大则可达到 1.12mm（图 6-3）。由于其表现总体稳定，个别

表 6-3　四季划分表

地点	春		夏		秋		冬	
	出现时间	持续时间/月	出现时间	持续时间/月	出现时间	持续时间/月	出现时间	持续时间/月
澄城	4～5 月	2	6～8 月	3	9～10 月	2	11～3 月	5
洛川	4 月中～7 月中	3.2	7 月中～8 月上	1	8 月中～10 月中	2.0	10 月中～4 月上	5.8
屯留	4 月中～7 月上	3.0	7 月中～8 月上	1	8 月中～10 月中	2.3	10 月中～4 月上	5.7
隰县	4 月中～7 月上	3.0	7 月中～8 月上	1	8 月中～10 月中	2.3	10 月中～4 月上	5.7
延安	4 月中～6 月中	2.3	6 月下～8 月上	1.7	8 月中～10 月上	2.0	10 月中～4 月上	6.0
定西	4 月下～7 月下	3.3			8 月上～9 月下	2.0	10 月上～4 月中	6.7
固原	4 月下～7 月下	3.3			8 月上～9 月下	2.0	10 月上～4 月中	6.7
海原	4 月下～7 月底	3.3			8 月上～9 月下	2.0	10 月上～4 月中	6.7
喀左	4～6 月	3.0	7～8 月	2.0	9 月	1.0	10～3 月	6.0

时段不稳定，故称之为交错稳定期。此时期，从总体上说，土壤水分变化不显著，水分保持相对稳定。

② 冬末春初水分缓慢蒸发期　此期仅 10～15 天，通常出现在 2 月下旬至 3 月中旬。这一时期，日蒸发量在 0.2～0.5mm 之间。它所对应的正是气温和土壤水分变化的转变时期。在我国北方半湿润偏旱区，春季气温在 5～10℃的时间不足 20 天，其后很快变暖，土壤蒸发加大，作物开始正常生长。

③ 春季水分大量损耗期　出现在 3 月 20 日～6 月 11 日，约 2 个多月时间。这一时期，随着气温回升，小麦返青拔节，需水量增加，故蒸发蒸腾量骤增，日平均值达 0.94mm，最高可达 1.41mm。这一期间的蒸发量能占到全年总蒸发量的 42%，而合阳试验区统计结果显示，竟达 80%以上。这一时期，土壤含水量达到全年最低值，为第二个失水高峰期。这一时期的农田水分状况对冬小麦生长非常重要，是作物的关键需水期。

④ 夏秋水分恢复期　此期出现于 6 月 20 日～12 月 20 日，持续时间较长。原在大量损耗期所失去的土壤水分在此期内逐步得到补偿，日补偿量平均为 0.53mm，补偿总量可达 93.6mm。不过此期间内，土壤水分补偿与恢复的快慢，前后期还有所不同。在 6 月 20 日～8 月 20 日这一时段，正值盛夏时节，尽管降水量大，但地表蒸发亦强，故土壤水分恢复比较缓慢，土壤水分的日补充量仅为 0.17mm。据统计，此期间降水量虽有 194.1mm 之多，但土壤水分恢复总量却仅为 31.2mm，仅占同期降水量的 16%。从 9 月起，天气逐渐转凉，地表蒸发和植物蒸腾减少，土壤水分的恢复加快，后一时段的土壤水分恢复总量达 57.2mm，占同期降水量的 30.2%。尤其 9～10 月份土壤水分恢复最快，是土壤蓄水最为有效的时期，因而秋后收墒工作十分必要。

秋季土壤水分虽以恢复为主，但也有因强烈蒸发失水，时间在冬小麦分蘖和越冬初期之间。这是因为11月中上旬以后，降雨急骤减少，旬降水量不足3mm，而气温仍然较高，保持在5～8℃。此时土壤墒情又好，毛管水非常活跃，故日蒸发量高达1.06～1.13mm，为土壤第一个失水高峰期，月失去的又都是土壤易效水。但这一时期持续时间较短，待进入冬季后，土壤水分就基本稳定了。

高原地区（以洛川、屯留、隰县为例）。与台原地区相比，这一地区的海拔高度要高200～400m，气温低1～2℃冬季长约一个月，夏季短一个月，春季长半个月。由于这些因素的影响，其农田土壤水分动态不同于台原地区，可划为3个时期。一是土壤水分大量损耗期。此期可分为两个时段：秋末（10～11月）为第一个失水高峰时段，春夏（4～6月）是第二个失水高峰时段。第一个失水高峰时段是在雨后高湿度下失水，以蒸发为主，耗水强度达到0.7～4.0mm。隰县由于土壤水分恢复期延长到11月，土壤水分损耗期相应推迟到12月份。第一个失水高峰的总失水量比较多，约占22%～34%，也就是说有五分之一到三分之一恢复水在此期间又损失掉了。据屯留测定结果，9月下旬～10月中旬一个月内，土壤就耗水99.4mm。此时，冬小麦处于苗期，蒸发是失水的主要方面，雨后保墒不容忽视。在第二个失水高峰时段（4～6月），则是在高温和作物生长旺盛期出现的高失水过程，其耗水强度、耗水总量均远远超过第一个高峰时段。据统计，本时段内净失水量达0.95～4.47mm（表6-4），占生育年度失水总量的41.7%～67.1%。通常认为深层土壤供水是冬小麦后期生长的重要水分来源。据李玉山研究，100～200cm土层的水分利用系数为1200～500cm土层的水分利用系数则为0.3～0.6。气象因子影响水分移动的深度，一般在0～60cm，在干旱年最多加深到80cm，而以下深度层土壤水分的消耗均系因作物根系吸收利用所致，占土壤供水量的59.1%（表6-5），深层土壤供水平均为122.92mm，占当地旱地耗水量（400mm）的30.7%。

表6-4 各地冬小麦田（0～2m土层）日平均净失水量 单位：mm

日期	03月21日	04月01日	04月14日	04月30日	05月15日	06月02日	06月15日	07月01日	占总失水量
陕西洛川	—	-	1.06	2.45	1.91	0.53	1.20	0.63	67.1%
山西屯留	—	3.29	·	3.84	4.47	0.95	—	—	48.1%
山西隰县	—	0.31	0.78	0.78	1.27	2.18	0.47	—	41.7%

表6-5 麦田深层土壤供水（洛川，1980～1981年）

土层深度/cm	土壤供水/mm		土壤耗水/mm	各层占总耗水量/%	50～200cm深层用水比例
	10月05日	06月15日			
0～50	108.6	41.6	67.0	40.9	59.1%
50～100	102.7	54.6	48.1	29.3	
100～150	107.3	74.8	32.5	19.8	
150～200	94.3	78.0	16.3	10.0	
0～200	412.9	249.0	163.9	100.0	

第二失水高峰期扩大了作物用水库容，和同类型地块的裸地相比，50～150cm 土层多供水 76.1mm，提高了水分利用效率。

在高原地区除冬季出现一段缓慢蒸发的过程外，其他时间均未出现。高原缓慢蒸发期的时间比台原地区提前半个月，主要是由于土壤湿度高，温度低所致。

（2）土壤水分垂直变化

因不同土壤层次而表现不同。台原地区速变层深度为 0～10cm，活跃层为 10～40cm，次活跃层为 40～200cm；高原地区速变层土层深度为 0～80cm，活跃层为 80～200cm。它们比裸地的活跃层（表 6-6）分别向下延深 10cm、50cm、180cm。作物深层土壤水分的有效性提高了 1～2 个等级。台原地区的水分活性受气象因子影响大，它使深层土壤水分经常处于变化之中，无论种植或不种植作物，土壤垂直水分损失都很大。在高原地区，土壤深层储水能力强，种植作物后，可以发挥深层土壤供水的作用。屯留试验结果表明，冬小麦农田深层储水具有明显的季节性调节作用（见图 6-4），能缓解干旱对冬小麦生长的影响，其中 1m 以下土层的水分可储存达 8 个月。

表 6-6　裸地和麦田土壤水分的垂直变化

地点	类型	速变层深度/cm	活跃层深度/cm	次活跃层深度/cm	相对稳定层深度/cm
澄城	裸地	0～10	10～30	30～200	—
	麦田	0～10	10～40	40～200	—
	差值	0	+10	+10	
洛川	裸地	—	0～20	20～70	70～200
	麦田	0～80	80～200		
	差值	0～80	60～180		

冬小麦地比裸地多利用的土壤水分量为 50.9～127.2mm，深层土壤水分利用量所占比例更高。

表 6-7　裸地和麦田对土壤水分利用量比较

地区	土层/cm	裸地/mm	冬小麦/mm	差值 %	差值 mm	各层占比例/%	地区	土层/cm	裸地/mm	冬小麦/mm	差值 %	差值 mm	各层占比例/%
澄城（容重1.32）	0～50	8.7	8.2	0.5	3.3	6.5	洛川（容重1.30）	0～50	11.3	6.4	4.9	31.9	25.1
	100	12.0	9.2	2.8	18.5	36.4		100	15.6	8.4	7.2	46.8	36.9
	150	10.0	8.3	2.3	15.2	29.9		150	15.8	11.5	4.3	28.0	22.1
	200	9.8	7.7	2.1	13.9	27.2		200	15.1	12.0	3.1	20.2	15.9
	0～200	10.3	8.3	2.0	50.9	100.0		0～200	14.4	9.6	4.8	126.9	100.0
安塞（容重1.20）	0～50	8.6	5.3	3.3	19.8	18.7	合阳（容重1.34）	0～50	17.7	14.5	3.2	21.4	19.8
	100	13.1	6.1	2.0	42.0	39.5		100	16.7	10.7	6.0	40.2	31.6
	150	13.4	8.4	5.0	30.0	28.2		150	16.6	11.7	4.9	32.8	25.8
	200	12.0	9.6	3.4	14.4	13.6		200	16.6	11.7	4.9	32.8	25.8
	0～200	11.8	7.2	4.6	106.2	100.0		0～200	16.9	12.2	4.7	127.2	100.0

注：资料年代：澄城，1985 年 7 月 20 日；安塞，1973 年 7 月 20 日；
洛川，1991 年 7 月 1 日；合阳，1989 年 6 月 20 日。

掌握冬小麦土壤水分的变化规律，进行土壤水分调剂和合理使用，对提高土壤水分利用率会有很大的帮助。在这方面，秋雨春用就是一个重要途径，如轮作调水，覆盖保水等都是可取的方法。

6.1.2.2 春玉米田土壤水分动态

(1) 时间分布

在半湿润偏旱区，春玉米的生长期和雨季同步，其土壤水分动态规律和冬小麦田不同。土壤水分按其变化可分为以下几个时期。

① 冬末和春季表层土壤干湿交替期　此期一般在2月下旬～5月中旬。其特征是土壤水分变化基本稳定（表6-8），平均日净失水0.19mm，土壤水分变化不大。但在这个时期内，天气由冷变暖，降水由少变多，霜冻期还没有结束，而玉米又进入苗期，故土壤水分有较大变化，大体经历3个小过程。第一个小过程在初春，由于土壤逐渐解冻而形成返浆现象，土壤水分趋于恢复。此时相当大一部分土壤水分聚集于土壤表层，致使土壤含水量显著增大。有的层次土壤水分可超过田间持水量（表6-9）。此时土壤返浆恢复水日平均增长幅度较大，可由0.14mm增大到4.67mm。水量较高且气温回升，故蒸发加剧，日净失水量在1mm左右，持续时间15～30天不等。上一时段的返浆恢复水，经此阶段的大量蒸发而损耗殆尽。其后是第三个过程，农田土壤水分随着降雨的影响而交替变化。降雨时土壤水分恢复，雨后则蒸发增加，出现多次反复，这种变化多发生在0～50cm的土壤表层内。

表6-8　半湿润偏旱区春玉米田土壤水分状况　单位：mm

地点	观测时间			2m土层总失水量	日净失水量
	02月20日	05月20日	差值		
澄城	12.9	11.4	1.5	39.0	0.43
洛川	16.8	16.6	0.2	5.2	0.06
屯留	16.6	16.4	0.2	8.4	0.09
隰县	13.0	13.6	−0.6	14.9	0.17
平均					0.19

表6-9　洛川玉米地历年初春土壤水分变化　单位：mm

深度/cm	1981年			1982年			1983年			1986年		
	03月15日	04月01日	差值	03月15日	04月01日	差值	02月05日	03月01日	差值	03月01日	03月15日	差值
0～10	15.9	17.2	1.3	12.5	15.3	1.8	10.4	9.5	−0.9	8.7	7.6	−1.1
20	17.7	17.1	−0.6	15.5	17.4	1.9	20.0	22.0	2.0	21.6	19.7	−1.9
30	18.7	18.5	0.2	16.5	18.1	1.6	19.6	22.1	2.8	20.8	21.7	0.9
40	18.6	19.5	0.9	16.4	19.2	2.8	17.8	20.1	2.3	16.5	18.1	1.6
50	18.2	20.6	2.4	16.3	18.5	2.2	17.8	16.8	−1.0	18.0	18.1	1.9
60	19.6	19.6	0.0	16.8	19.7	2.9	16.6	17.7	1.1	17.1	17.2	0.1
70	17.3	19.3	2.0	16.4	19.3	2.9	17.1	18.1	1.0	16.6	17.2	0.6

② 降水补充和玉米耗水同步的缓慢失水期 此期出现在 6～8 月，平均日失水量 0.13mm，其中稳定期的日失水量在 0.19～0.07mm 之间，缓慢期日失水量在 0.20～0.48mm 之间，一直延续到 8 月中旬，土壤水分恢复量较小。7～8 月是黄土高原地区的雨季，多年月平均降水量在 112.1～128.9mm 之间，是 6 月份降水量的 2 倍。但此阶段正值春玉米拔节、抽穗、开花的关键时期，对水分的需求量特别大，平均日耗水量 3.5mm，尤其是 7～8 月份高达 4.6mm。在多雨年份，此期间内土壤水分还能得到一定恢复，如屯留试区 1988～1989 年测定，6 月 19 日～8 月 2 日，日恢复量达 2.69mm。澄城杨家陇试区测定，日恢复量达到 0.76mm，除此之外，日平均耗水量一般为 2.43mm。

③ 土壤水分恢复期 此期在 9～10 月，土壤水分含量可达到当年的最高值。从多年情况来看，在高原地区这一期间的土壤水分能恢复到田间持水量的 88%～100%，多年平均为 91%。在台原地区则略有不同，土壤水分只能恢复到田间持水量的 70%，故本区玉米收获后的保墒工作要加强。台原地区土壤水分恢复差的原因，主要是底墒消耗过多。据澄城县杨家陇试验区测定，1988 年玉米地 1～2m 土层的土壤含水量保持在 8%～9%，1989 年保持在 14%～15%，1990 年只有 8%～9%，亦即底墒已降到田间持水量的 63%～36%，而 9～10 月的最恢复深度却只延伸到 1.20～1.40m 处。1990 年，土壤水分仅恢复到 50cm 深，土壤湿度仅上升到 11%～13%。土壤水分的这种高消耗，低恢复，使得在台原地区种植春玉米带有较大的风险性，在丰水年或上年秋季土壤水分得到较好恢复的年份，每亩玉米可达 500～600kg，而在干旱年则将出现较大幅度减产或绝收。

④ 冬季土壤水分缓慢蒸发期 此期出现于 11 月到翌年 2 月，长达 4 个月。这一时期的特点是，降水量显著减少，日蒸发量小，但持续时间长，故累积蒸发量仍较大，农田水分变化总的趋势为缓慢失水。见表 6-10。

表 6-10 半湿润偏旱区春玉米田冬季失水量（0～2m 土层）

类型	地点	土壤湿度/%		失水量		年数/年
		11 月 01 日	03 月 01 日	/%	/mm	
高原	洛川	17.81	16.83	0.98	25.48	7
	隰县	14.26	12.83	1.43	34.32	4
台原	澄城	14.90	12.90	2.00	52.80	2

(2) 玉米土壤水分垂直变化特征

就垂直变化而言，可将土壤分为速变、活跃、次活跃和相对稳定四个层次，而将相对稳定层以下的土层称为土壤水分未被利用层。

在半湿润偏旱地区，在丰水年，春玉米生长所利用的土壤水分主要是当年的降水。春玉米田土壤水分活跃层接近于地表层，而 10～180cm 土层则将蓄积一部分当年的降水。春玉米在生长过程中所需之水分也就是通过 0～50cm 土层的调节活动来充分利用同期降水而得到满足的。在干旱年，春玉米正常生长所需的水分则主

要是靠土壤水库的调节和供应而得到保证的。因此，在干旱年，土壤水分的活跃层和次活跃层可深至 2m 以下。但从多年情况来看，在本类地区，春玉米生长所需之水分主要还是依靠当年的降水。

6.2 旱地农田土壤水分平衡

水资源短缺与浪费并存是北方旱地农业水危机的主要特征，一方面农业供水因水资源短缺而难以增加，同时由于工业和城市的发展进一步削减已经明显不足的农业用水，农业缺水问题日益突出。不仅灌溉面积难以扩大，而且现有的灌溉面积也难以稳定，另一方面是农业水资源严重浪费，有很大的节水潜力。因此，今后旱地农业的发展的根本出路在于发展节水农业。

6.2.1 主要农作物耗水规律

农作物耗水主要是两个部分：一是棵间土壤蒸发量，二是作物蒸腾量。其实供给农作物光合作用消耗的水分量是很少的，一般不足作物总耗水量的 1%。农作物在生长期间土壤蒸发和作物蒸腾的总耗水量叫做蒸散。以冬小麦为例，冬小麦耗水量以棵间土壤蒸发为主，达 193mm，占总耗水量的 57%。春玉米、春谷子、马铃薯的棵间蒸发量分别占总耗水量的 44.3%、46.9%和 45%（表 6-11），即 45%左右的耗水量是通过棵间蒸发损失掉。据山西省气象科学研究所对晋南水分平衡方程计算，该地区年平均降水量 535mm，径流和渗漏占 17%，约 83%的降水渗入农田土壤中，即 443mm 的降水量为植物蒸腾和土壤蒸发所耗用。按旱地粮食产量 1875kg/hm^2、每毫米降水量生产粮食 10.05kg 标准计算，则只用了 186mm 降水，即农作物有效蒸腾仅占年降水量的 35%，土壤蒸发达 258mm，占降水总量的 48%，径流、渗漏和农田蒸发损失了 65%的降水量。这充分表明，北方旱地农业产量低并不仅仅是由于水分短缺，而在较大的程度上是由于水有效性差所造成的。因此，提高农作物的产量，关键是提高有限水分的利用率和效率。

表 6-11 作物耗水去向结构

类型区	作物	总耗水量/mm	植物蒸腾		棵间土壤蒸发	
			数量/mm	占耗水量/%	数量/mm	占耗水量/%
半湿润偏旱区	冬小麦	339.95	146.1	430	193.8	57.0
	春玉米	409.1	227.8	55.7	181.2	44.3
	春谷子	380.65	202.1	531	178.5	46.9
半干旱偏旱区	马铃薯	250.0	137.8	55.0	112.7	45.0

旱地农业水分的来源主要是两个方面：一是生育期自然降水，二是土壤水库供应。同一地区不同农作物或是同一作物在不同地区，对上述两种水分来源的利用所占的分额是不同的。冬小麦一般在 9 月中下旬至 10 月上旬播种，翌年 5 月底至 6

月中下旬成熟，全生育期的降水量仅能满足高产小麦需水量的 1/4～1/2，不足部分需要从土壤储存的水分来补充。半湿润偏旱区冬小麦的耗水量为 372.5mm，其中生育期间天然降水量可提供 237.7mm，占总耗水量的 63%左右，而土壤中水库提供 134.8mm，占总耗水量的 37%。由此可见，土壤储水和供水能力对旱地冬小麦生产具有非常重要的作用。不同作物耗水来源结构（表 6-12）表明，半湿润偏旱区春播作物耗水量的 90%以上来自生育期的自然降水，半干旱区春播作物的耗水量的 80%以上来自生育期的天然降水；半干旱偏旱区春小麦耗水 93.3%来自生育期降水，马铃薯耗水的 100%来自生育期间降水。

表 6-12　不同作物耗水来源结构

类型区	作物	总耗水量	天然降水		土壤供水	
			数量/mm	占耗水量/%	数量/mm	占耗水量/%
半湿润偏旱区	冬小麦	372.5	237.7	63.0	134.8	37.0
	春玉米	400.4	408.0	101.8	−5.78	−1.8
	春谷子	377.6	372.4	98.1	5.2	1.9
	春甘薯	425.2	394.4	92.8	30.5	7.2
半干旱区	春小麦	280.6	223.3	79.5	57.4	20.5
	春玉米	377.7	220.1	84.7	57.1	15.4
	马铃薯	332.5	353.6	106.3	−21.1	−6.3
	胡麻	268.5	319.5	119.0	−51.0	−19.0
半干旱偏旱区	春小麦	227.6	212.4	93.3	15.2	6.7
	马铃薯	252.55	252.9	100.2	−0.014	−0.2

6.2.2　影响土壤水分利用率提高的主要限制因子

作物水分利用效率（water use efficiency，WUE）是作物-水分关系研究中的一个重要理论问题，节水农业所追求的目标之一就是尽可能获得高的 WUE 值。近年来，对于作物水分利用效率概念的定义一般都可以从单位水分消耗所生产的同化物的角度上予以理解。在群体水平上，水分消耗指的是蒸散量，考虑全生育期，WUE 可表示为：

$$WUE = Y/ET$$

其中，Y 为经济产量；ET 为全生育期蒸散量，即耗水量。

作物水分利用率的种间和品种间差异不同光合途径（C4、C3、CAM）类型和不同种类作物，WUE 存在很大差异。C4 作物（玉米、高粱、甘蔗等）的 WUE 较 C3 作物（小麦、水稻等）高 2～3 倍，CAM 植物是已知 WUE 最高的植物，品种间的 WUE 也有一定的区别，有报道指出小麦外界生态因子对作物水分利用率的影响较大。

作物水分利用率与两个生理过程相关联，与光合速率成正比，与蒸腾速率呈反比，梁宗锁和康绍忠（1996）研究发现在夏玉米冠层中各种生态因子对 WUE 均有

明显的影响，但以光照为主因子。另外，温度主要通过对于蒸汽压力的影响而影响蒸腾，气温上升可使水分变化值增大而降低 WUE，但各种作物均有其最适生长温度，过度降低时抑制生长，喜凉作物在较高温度下，喜暖作物在低温下，WUE 均显著下降。一天内昼夜温差对作物生长影响显著，多数作物在一定限度内低夜温有利，高夜温增强呼吸不利于干物质累积，从而导致 WUE 下降。土壤水分状况直接影响作物水分状况，进而影响其他生命活动，但作物会经常遇到土壤水分不足的问题，水分亏缺对于作物 WUE 影响视缺水程度及延续时间等情况而异，水分亏缺对于作物 WUE 影响视缺水程度及延续时间等情况而异，在轻度水分亏缺下，WUE 是提高的，但在严重干旱下是下降的，这一规律在小麦、玉米、谷子、糜子、高粱等作物上得到证实。

北方旱地农业的发展主要受制于降水量少和灌溉的水资源不足，而地力不足则导致有限降水的有效性和转化效率低。因此，土壤肥力不足成为旱地农业产量低而不稳的主要直接制约因素之一。

北方旱地农业有 45%的耕地缺乏有机质（有机质含量小于 10g/kg），有机质含量在 20g/kg 以上的耕地不足 14%，而全国有机质含量不足 10g/kg 的耕地仅占 25%，全国 1/3 耕地有机质在 20g/kg 以上。其中东北地区土壤有机质含量状况较好，缺乏有机质的耕地只有总耕地面积的 15%，68%耕地的土壤有机质含量在 10～30g/kg 之间，有机质含量在 30g/kg 以上的耕地占 15%。黄土高原土壤有机质状况最差，约 60%耕地缺乏有机质，30g/kg 以上的耕地不足 2%。华北地区一半以上的耕地土壤缺乏有机质，有机质含量在 30g/kg 以上的耕地几乎没有。如山西全省土壤有机质含量在 10g/kg 以上占总耕地的 40%，35%耕地土壤有机质含量在 5g/kg 以下。西北地区耕地土壤有机质含量略高于华北地区，缺乏有机质的耕地占 48%，仅有 1.5%的耕地土壤有机质含量在 30g/kg 以上。

北方地区土壤含全氮量小于 0.76g/kg 的贫氮耕地占一半以上，比全国高 16 个百分点。其中华北地区和黄土高原土壤含氮量在 1.5g/kg 以上的耕地几乎是零，两个地区贫氮耕地均占 70%以上。黄土高原全氮含量小于 0.5g/kg 的缺氮耕地占 1/3 以上，东北土壤全氮含量优于北方其他地区，贫氮耕地只占 20%，西北贫氮耕地占 37%。经土壤普查，山西全省全氮含量平均 6.5g/kg，约有 1/3 的耕地土壤含氮量 10.5g/kg。北方土壤普遍缺磷，55%以上耕地极度缺磷（速效磷含量小于 5mg/kg），其中西北和华北尤其严重，极度缺磷的耕地分别占 62%和 58%，东北和黄土高原的土壤含磷状况好一些。北方土壤含钾量从总体来讲好于全国，土壤速效钾含量小于 50mg/kg 的耕地不足 5%，2/3 以上的耕地速效钾含量大于 100mg/kg。

北方地区基础肥力不足是多方面因素所造成的，它与地形地貌、地质、土壤以及气候等自然条件有直接关系，但更主要的是人口的过度增长，掠夺性开发利用旱地区资源来满足日益增长的食物需求，由此使我们付出了沉重的代价，造成旱区农

业生态系统循环障碍，土壤肥力下降。形成这种局面的原因主要是投入不足和土壤水土流失严重。水分和养分是农作物生长发育过程不可缺少的物质条件，二者互相关联，互相影响。薄旱相连是旱地农业生产中普遍存在的问题，土壤贫瘠导致农作物营养不良，提早受旱，气候干旱又容易加剧农作物营养不良。加强土壤水分供应可以提高土壤养分的增产效果，同时改善土壤的理化性质，又可以增强农作物的耐旱性，从而提高水分的有效性和利用效率。

旱地农作物的产量与降水量多寡密切相关，但其根本原因是土壤供水减少时，作物难以将有限的水分吸收利用，致使作物减产。因此，旱灾减产不仅是因为缺水，而且与缺肥有直接关系。为此，提高旱地农业产量要做到水肥并重，以肥调水。

6.3　提高土壤水分生产率的途径

6.3.1　选用抗旱节水优良品种，改善种植结构

我国北方地区降雨量偏少，且年内、年际间变化较大，雨水集中的 7、8、9 三个月的降雨量占年降雨量的 60%～70%。因此，要根据当地的自然特点，合理进行作物品种搭配，调整播期，使生育期耗水与降水相耦合，提高作物对降水的有效利用，以充分发挥品种、气候和水资源的增产潜力，提高 WUE。充分利用生态学的时、空设计原理进行作物品种搭配，在空间上加厚作物地下、地上的利用层，做到高矮秆、深浅根作物间作；在时间设计上利用种群嵌合、种群密结等套种形式，提高农田水分利用率，增产增收。玉米是陇东第二大粮食作物，也是主要的饲料作物，在黄土旱塬雨养农业区，由于缺少外来水源和地下水源的灌溉条件，发展节水农业的核心是提高当地天然降水的利用效率。随着农业产业化的发展及作物生育期干旱气候的加剧，生产上急需高产、优质、抗旱的玉米品种。

甘肃省农业科学院旱地农业研究所从省内外育种单位引进高产、优质玉米新品种 10 个，在省农科院镇原试验站进行了品比试验。2009 年对当地主推品种及引进品种进行了综合对比试验。结果显示，在特殊年份中玉 9 号、富农 1 号、永玉 3 号等 3 个品种抗逆性强，适应性好，产量较高。

针对解决小麦生产不合理灌溉，水分利用率较低问题，运用系统工程原理，从建立小麦生产土、肥、水、苗的良性生态系统切入，采取选用高产节水品种，以土储水、以肥养土、以土培苗、以苗用水综合节水技术路线，在有关地区建立了 1 万公顷小麦节水栽培标准化示范区，并编制了《小麦节水栽培技术规范》地方标准，有效解决了当前小麦生产上存在灌溉与优质高产的矛盾。

6.3.2　保护性耕作提高土壤储水能力

东北农业大学 2005 年在黑龙江省甘南县进行了节水集成技术（振动深松技术

＋机械化暗式坐水种技术＋苗期补灌技术＋坡耕地垄向区田技术）对土壤含水量及其大豆产量影响的试验研究，在全生育期对土壤水分指标及大豆产量进行了观测，对观测数据进行了统计分析。并采用基于熵权的灰色关联法对不同的试验处理进行了综合评价。结果表明：节水集成技术可有效地提高土壤含水量，具有较好的节水作用，同时大豆产量以及水分利用效率增加显著；振动深松和垄向区田情况下的处理6（即试验组中第6个试验条件，坐水量83.07m^3/hm^2，补水量120m^3/hm^2）为最优。

中国气象局兰州干旱气象研究所等单位选择黄土高原旱作区8个冬小麦测站2m土层深度多年土壤储水量与产量资料，从大气降水-土壤水-作物循环系统的理论观点出发，研究了土壤储水力和农田耗水量对冬小麦水分生产力的影响。该区域是一个储水和保水性能良好的天然土壤水库，半干旱区、半湿润区、湿润区1m和2m土层内最大储水力分别为270mm、299mm、331mm和561mm、605mm、676mm，随湿润度增加而增大；但实际储水能力只有111mm、183mm、269mm和230mm、370mm、550mm，相当于半干旱区、半湿润区和湿润区最大储水力的41%、61%和81%，可达到最适宜储水量的51%、76%、102%。半干旱区远不能满足冬小麦生长需要，达到严重干旱程度；半湿润区只能勉强维持生存需要，达到轻度干旱，必须采取一套有效保墒耕作抗旱措施。冬小麦全生育期2m土层农田实际耗水量和蒸腾系数分别为304～343mm和330～648，随干旱程度增加而增大。冬小麦全生育期降水量只能满足耗水量的65%～95%，有5%～35%的耗水量是从播前土壤储水量补给的。冬小麦营养生长阶段浅层耗水量大于生殖阶段，但深层耗水量正好相反。土壤储水量是该区域冬小麦生产力最重要因素，冬小麦土壤水分籽粒生产力为0.30～1.38kg/mm，平均为0.87kg/mm，生物产量生产力为1.416kg/mm，随干旱程度增大明显递减。旱作区冬小麦水分生产力低而不稳，但潜力很大。必须在肥力、耕作、管理等措施上要跟上，水分生产力水平才能提高。

6.3.3 覆盖保墒技术

秸秆覆盖农田对蓄雨保墒、培肥增产收到良好效果。秸秆覆盖一般可节水15%～20%，增产15%～20%，覆盖材料一般用麦秸或其他作物的有机残体，其长度在30cm以下为好。玉米、高粱等高秆作物，可采用整株秸秆用于冬闲地和中耕作物行间覆盖。农田覆盖量一般以每公顷覆秸4500～6000kg为宜。冬小麦田除夏闲期应尽早于伏耕后覆盖以利蓄雨保墒，覆盖时必须将秸秆撒均匀，力求厚薄均一。对春播作物，玉米以拔节初期，大豆以分枝期为宜。

地膜覆盖现已成为农业节水增产的一项重要措施。地膜覆盖具有增温和保墒效应，能有效抑制土壤水分的无效蒸发，覆盖塑料薄膜，可增加耕层土壤水分1%～4%，节水20%～30%，增产30%～40%。针对陇东旱作农业区年降水量少、季节分布不均，特别是冬小麦生产中干旱问题，从改善旱地冬小麦生长环境和栽培条

件、提高降水利用率入手，将小垄沟集水和覆膜保墒技术有机地结合在一起，进行了旱地冬小麦膜沟栽培水分利用率研究。研究表明，采用膜沟方式栽培，可克服自然降水利用率低等弊端，使水分利用率（WUE）较露地平播提高 13.7kg/（hm^2·mm），冬小麦返青期-成熟期干物质积累较露地平播提高 766g/m^2；冬小麦单产较传统露地平播栽培增产 23.86%，是陇东旱地冬小麦自然降水高效利用、实现高产稳产的最佳模式。田间试验和调查结果表明，旱地小麦全生育期地膜覆盖栽培以其突出的聚水、保墒性能，明显改善了麦田的水分条件，促进了小麦个体生长发育，小麦单位面积穗数、穗粒数和千粒重明显增加，并使旱地小麦的增产、增收效果明显好于露地播种小麦。地膜覆盖栽培技术是旱地小麦实现高产稳产的一项突破性技术措施，是解决我国干旱半干旱地区小麦生长期缺水问题的关键性措施之一。

采用秸秆覆盖措施，减少玉米棵间土壤蒸发量，降低土壤水分消退速度，在增强了土壤的蓄水和保水能力的同时，提高了水分利用率，为玉米生长创造了适宜的土壤水分条件，有力地保障了玉米的生长发育的需要，为玉米的增产增收创造了有利的条件。郑家国等人的研究利用前作秸秆覆盖后作和周年免耕，通过相应的技术集成，形成高效节水抗旱农作模式，将抑蒸保墒和培肥地力结合起来，可以达到节水抗旱、轻简高效又有利于资源循环利用、可持续发展的目的。结果表明：模式 1（小麦-水稻-秋菜，周年免耕，早季稻草全田覆盖，水稻季麦秸宽行覆盖，作物秸秆全部还田）和模式 2（马铃薯/油菜-水稻，周年免耕，早季稻草垄上覆盖，水稻季油菜秸秆宽行覆盖，作物秸秆全部还田）与 CK1（小麦-水稻，翻耕，不覆盖，作物秸秆全部移除）和 CK2（油菜-水稻，翻耕，不覆盖，作物秸秆全部移除）相比，可提高土壤耕作层土壤含水量、储水量和水分利用率，平均周年节水 2600m^3/hm^2 以上，可充分利用秋季光热资源，增种短季秋菜创造较高的效益，同时不耽误小春作物的种植，增加经济效益 15000～21000 元/hm^2，实现了节水高产高效。

6.3.4 化学调控技术

选用减少作物蒸腾、吸水保水、抑制蒸发的化学制剂，是改善和调控环境水分条件，增强土壤-作物的抗旱能力，提高水分生产潜力的又一有效途径。目前应用较多的抗旱化学制剂主要包括保水剂、蒸腾抑制剂和土壤结构改良剂，多属有机高分子物质。

山西省襄汾县农业技术推广中心 2002～2005 年在山西太原、清徐和临汾就旱地冬小麦应用绿色抗旱剂的喷施技术及节水效应进行了研究。结果表明：GDR5 号喷施以稀释 225 倍的增产效果最为显著，其次为稀释 300 倍和 150 倍，增产幅度为 5.2%～18.5%；GDR5 号喷施以起身喷＋灌浆（挑旗、抽穗）喷的效果最好，其次为起身喷。增产幅度为 10.2%～20.6%；绿色抗旱剂拌＋喷试验表明以 GDR1 号拌种＋GDR5 号起身期喷施效果最显著。各个绿色抗旱剂叶面喷施的节水效果以 GDR5 号的较高，其次为 GDR2 号和 GDR1 号。该项研究为旱地冬小麦应用生长

调节剂开辟了新的领域。

保水剂是一种新型的有机高分子聚合物，具有高吸水、保水性能，在土壤中施用后，不仅可以增加土壤液相比例，提高持水力，而且能更有效地保持土壤养分，可使土壤的蒸发量降低 21.1%～20.7%。小麦、玉米用保水剂拌种后，出苗率较对照可提高 12.5%～30%，增产 10%～20%，经济效益上的产投比约为（10～20）：1，对干旱缺水地区的农业发展具有十分重要的意义。

作物吸收的水分 99%以上是被其表面蒸腾消耗的，通过光合作用直接用于生长发育的大约不到 1%，因而抑制蒸腾是防旱抗旱的一个重要方面。

土壤结构改良剂是用来促进土壤形成团粒，改良土壤结构，固定表土，保护耕层，抑制土壤蒸发，防止水土流失的高分子化合物的总称，包括矿物制剂、腐殖质制剂和人工合成制剂。

6.3.5　水肥耦合技术与水肥一体化技术

水肥耦合互作增产技术是指灌溉与施肥两者在“时间、数量和方式”上进行合理配合，以肥调水，以水促肥，充分发挥水肥协同效应和激励机制，提高抗旱能力和水分利用率。

通过温室盆栽试验，研究了不同土壤水分和施氮量条件下春小麦的耗水量和水分利用率等相关参数的变化情况。结果表明：春小麦耗水量、生物产量及经济产量均因土壤水分和施氮量的不同而变化。水分充足，春小麦耗水量、生物产量及经济产量均随施氮量的增加而显著增加；中度水分胁迫下，低氮处理的耗水量、生物产量及经济产量均最高，最适氮处理与 CK 处理（对照处理）接近；干旱条件，低氮与 CK 处理耗水量和产量接近，而最适氮处理则极显著降低。各生育时期的耗水量和日耗水量在不同生育时期存在差异，其中以灌浆期春小麦日均耗水量为最高。在不同土壤水分条件下，春小麦地上部分干重和籽粒的水分利用效率随施氮量的增加而增加，尤以水分充足条件下水分利用率随施氮量的增加最为显著。

旱作地区农田施用畜肥后对主要的粮食作物都有显著的增产效果，其增产率 16.18%～45.62%。不同畜肥的肥效为羊圈肥＞猪圈肥＞马圈肥。不同粮食作物每公顷施用 1.5t 畜肥分别增产：羊圈肥增产春小麦 289.5kg/hm^2、豌豆 444kg/hm^2、马铃薯鲜薯 2910kg/hm^2；猪圈肥增产春小麦 267kg/hm^2、豌豆 156kg/hm^2、马铃薯 2422.5kg/hm^2；马圈肥增产春小麦 66kg/hm^2、豌豆 156kg/hm^2、马铃薯 1830kg/hm^2。水分利用率分别提高：春小麦 19.05%～80.95%、豌豆 17.78%～53.33%、马铃薯 49.7%～79.29%。

6.3.6　节水灌溉技术

① 喷灌技术　喷灌是利用专门的设备将水加压，或利用水的自然落差将有压水通过压力管道送到田间，再经喷头喷射到空中散成细小的水滴，均匀地散布在农

田上，达到灌溉目的。喷灌几乎适用于所有的作物、土壤和地形，特别适用于地形起伏大的山丘区、土壤透水性强的沙土，以及地形复杂难以用地面灌溉的地方。现阶段适合在我国大面积推广的主要有固定式、半固定式和机组移动式三种喷灌形式，与地面灌溉相比，大田作物喷灌一般可省水 30%～50%，增产 10%～30%。

② 微灌技术　微灌是一种新型的用水效率更高的节水灌溉技术，包括滴灌、微喷灌和渗灌等，微灌常以少量的水湿润作物根区附近的部分土壤，主要用于局部灌溉，微灌适用于所有的地形和土壤，但代价较高，在大田中难以推广。对于设施栽培如温室塑料大棚等以及果园区中高产值经济作物，深受欢迎，与地面灌溉相比，微灌一般省水 50%～80%，增产十分显著。

③ 膜上灌技术　膜上灌是在地膜覆盖栽培的基础上，把膜侧行水改为膜上行水，通过放苗孔直接向作物供水的一项田间节水增产灌溉技术。采用膜上灌解决了地膜覆盖下的灌溉技术，它是一种局部灌溉，能有效地防止深层渗漏，大大减少了棵间无效蒸发，可节水 20%～30%，节肥 15%左右，增产 10%～15%，水分利用效率提高 25%～40%。

④ 作物交替隔沟灌溉技术　交替隔沟灌溉技术为大幅度减少对栽培作物供水的可行性提供了理论依据，是对传统地面灌溉技术理论提出的又一新的挑战，采用交替隔沟灌溉技术可减少作物奢侈的蒸腾耗水，还可减少棵间全部湿润时的无效蒸发和总的灌溉用水量，作物叶片的气孔行为得到了优化，蒸腾速率降低，而作物的光合作用没有受到明显影响，作物水分利用效率得以明显提高。

⑤ 作物调亏灌溉技术　调亏灌溉 RDI（Regulated Deficit Irrigation）是 20 世纪 70 年代国际上出现的一种新兴灌溉方式，其主要根据作物的生理特性，使其生育期的某一阶段水分亏缺，并通过其他措施调节光合产物在群体和个体间的分配，抑制营养生长，增大根冠比，增强抗旱性，有利于作物籽粒形成期吸收更多的水分和养分，达到节水增产增益的目的。蔡焕杰对玉米的调亏灌溉技术进行了示范，结果显示，玉米生长期间共减少灌溉定额 42.2%，产量从 6480kg/hm^2 增加到 8055kg/hm^2，水分利用效率在原来的基础上提高 30%以上，年均每亩纯收益增加 80 元以上。该技术是一种新的灌水技术，还存在许多不完善的地方，有待以后进一步深入研究。

6.4　旱地耕作改制与农林牧综合发展

旱地耕作制度与农林牧发展关系密切。农业生产结构和种植制度是否合理，对农业生产力水平和资源利用效率有重要影响。确立与旱地农业区资源存在状况相适应的农业生产结构与种植制度，将有助于持续增进本区的农业持续发展，最大限度地把有限的降水资源潜力转化为现实生产力。

6.4.1 旱地农业区农业结构分析

6.4.1.1 旱地农业区自然条件与农业结构现状

我国的干旱、半干旱及半湿润偏旱地区约占国土总面积的52.5%，主要分布在昆仑山、秦岭、淮河以北的16个省、市、自治区，年降水量250～600mm，干燥度1.5～2.0。依据“中国耕作制度区划”的分区标准，通常把我国旱地农业区划分为北部中高原区和南部低高原区两个区域。由于各区自然条件的差异，长期以来，形成了各具特色的农业产业结构。

(1) 北部中高原区

本区包括内蒙古高原南部和黄土高原西部的内蒙古后山、河北坝上、山西高原北部、陕北长城沿线、宁夏中南、甘肃中部以及青海东部等地区。

本区自然条件主要表现为气候干旱冷凉，由西北向东南为半干旱偏旱向半干旱过渡类型。是我国太阳辐射能较丰富的地区，年总辐射量可达500～670kJ/cm^2。年平均气温1～8℃，最热月份为16～19℃，最冷月份为－18～－7℃。≥10℃积温2000～3200℃，年平均降水量多为300～450mm。降水呈现明显的大陆性气候特征，夏、秋降水集中，占全年降水总量的59%～72%，其中，降水强度≥25mm的低效降水占这一时期降水量的34%～51%；冬、春季≤5mm的无效降水占冬、春降水量的42%～48%。年干燥度为1.5～4.0。土壤为草原土壤类型，主要为栗钙土，部分为黑钙土。向西向北逐渐出现半荒漠土壤，如灰钙土、棕钙土、风沙土。

本区农业产业构成及比重有着自身的特点。本区属中高原地区，海拔1400～2200m，历史上为草原牧区。近代随着人口的增长，种植业才逐步发展起来。在土地利用构成中，牧业用地占较大比重，为45.5%；其次为农耕地，占35.4%；林业用地仅占3.9%。农林牧用地比例为9.1：1：11.7，属于牧农型土地利用方式。但由于草场重用轻养，退化严重，人工草地面积很少，畜牧业生产力水平不高。在农业总产值中，种植业大约占60%以上，牧业不足30%。北部中高原不同地区种植业基本条件见表6-13。

农田作物以喜凉和耐旱性较好的谷类和薯类作物为主（表6-14)。其中，春小麦、莜麦、青稞、黑麦、马铃薯比重大，占耕地面积的54%～67%。谷糜等在热量条件较好的黄土高原有相当面积。豆类作物包括豌豆、蚕豆、扁豆等，种植面积占10%左右，大豆仅有零星种植。经济作物主要是油料作物，占10%左右，以胡麻为主，还有少量的油菜、向日葵、芸芥等。农田牧草和绿肥比重较少。种植业呈以粮食生产为主体的单一结构，粮食作物、经济作物、绿肥与饲草作物分别占播种面积的82%、12%和6%。

由于受水热资源条件限制，本区的种植业通常实行单作一熟制。为适应灾害频繁、气候多变的自然条件，山区常采用混作、间作的多作一熟型种植模式，如宁南山区的胡麻与芸芥混作（花子)。苜蓿与谷糜混播。全区种植指数仅90%，约有10%的耕地实行休闲和轮歇制。

表 6-13　北部中高原不同地区种植业基本条件

地区①	耕地 /k·hm²	水浇地 /%	人均耕地 /(hm²/人)	年平均气温/℃	最冷月气温/℃	最热月气温/℃	≥10℃积温/℃
1	4645.5	8.7	0.39	2.0～5.0	−12.0～18.0	18.0～20.0	1500～2500
2	4183.5	13.8	0.28	6.6～8.0	−7.0～9.0	18.0～22.0	2000～3200

① 1 包括山后、坝上晋北高原地区；2 包括陇中、青东、宁中南黄土丘陵区。

表 6-14　北部中高原不同地区种植业结构

地区①	无霜期 /天	降水量 /mm	作物布局/%						复种指数 /%
			春小麦	杂粮②	马铃薯	玉米	谷子	油料	
1	100～200	300～450	16.0	44.0	10.3	2.5	5.8	12.3	84.6
2	120～140	350～480	35.4	30.0	9.0	1.4	5.3	8.2	96.4

① 1 包括山后、坝上晋北高原地区；2 包括陇中、青东、宁中南黄土丘陵区。
② 杂粮包括莜麦、谷糜、青稞、蚕豆、豌豆。

（2）南部低高原区

本区包括内蒙古兴安盟、通辽市、赤峰市，吉林的白城子地区，辽宁的朝阳地区与阜新的部分地区，冀北长城沿线（坝上除外），山西的大同盆地、太行山、吕梁山，陕西的北部、渭北和甘肃陇东等地区。

该区自然条件表现为光、热条件较为充裕。全年太阳辐射量为 500～585kJ/cm²，年日照 2000～2500h，优于同纬度其他地区。目前，光能利用率远低于 0.5%，有着巨大的生产潜力。年平均气温 4～12℃，无霜期 140～180 天，≥0℃积温为 3300～4300℃，≥10℃积温为 2500～3800℃。最冷月平均气温－3～15℃，最热月平均气温 22～25℃。由于太平洋暖湿气流受太行山、伏牛山及秦岭等山系的阻隔，降水量少于同纬度的华北平原及东北平原。北部年降水量多为 400～500mm，属于典型的半干旱地区，南部地区年降水量一般为 500～600mm，属半湿润偏旱区。本区是我国北方降水条件较好的旱作农区。因为气候的不稳定性，降水变率大，年变率达 15%～50%，7～8 月份为 30%～60%。春季≤5mm 的无效降水占这个时期降水量的 60%，夏季降水强度≥25mm 易产流的低效降水占这个时期降水量的 40%，因此，干旱成为本区农业生产经常性的威胁。

该区土壤类型较多，主要为发育于马兰黄土母质上的黑垆土类，以及发育于暖温带森林草原地带的褐土类。分布范围较大的还有壤土、黄绵土和栗钙土。此外，还有一定面积的风沙土和黑钙土。

该区农业产业构成及比重特点明显。地形、地貌甚为复杂，高原、丘陵、山地、沟谷阶地相间，分布于黄土高原、内蒙古高原，以及努鲁儿虎山、燕山、太行山、吕梁山、子午岭为主的山地等三个地貌类型。海拔高低差异悬殊，变幅在 200～1500m 之间。黄土高原的陇东和渭北地区海拔 600～1200m，覆盖着深厚的黄土母质层，为黄土高原地貌，生产条件好。陕北和晋西海拔 700～1300m，属黄土丘陵（沟、壑、墚、峁）地貌。由于黄土质地疏松，湿陷性强。抗蚀能力弱，极易水

蚀，是我国水土流失最严重的地区，生产条件差。努鲁儿虎山、燕山、太行山、吕梁山以及黄龙山、子午岭、陇山等为侵蚀的山地地貌，土层浅薄，生产条件较差。全区河谷阶地及山间盆地面积比重小，面积较大的有大同、忻定及长治盆地，生产水平高。西辽河流域平原农业区，为本区海拔最低（120～360m）的灌溉农业区，生产条件好，但位居科尔沁沙地边缘，沙化和盐碱危害较大。

境内林地面积约占土地面积5%。陕北延河以南林木覆盖度为25%～36%，其中黄龙山、桥山林区覆盖度为33.7%～34.9%，平均每公顷林木蓄积量36m^3。山西太行山林区覆盖率11.3%，蓄积量25.5m^3/hm^2，吕梁山林区覆盖度19.7%，蓄积量30m^3/hm^2。全区土地利用构成为：陇东、陕北高原沟壑区的林业和牧业占用较多土地，农林牧用地结构大致为1 ∶ 1 ∶ 0.7，其余如山西大同、忻定盆地、晋东南及豫西丘陵山区等地、县均以种植业为主。在农业总产值中，三个区的种植业均占较高比重，为66.4%～73.6%，林业占6.7%～11.0%，牧业占14.2%～16.3%，副业占3.4%～10.1%（见表6-15，表6-16）。

表6-15　黄土高原几个地区土壤利用现状

地区	总土地面积/千公顷	分类土地面积/千公顷				占总土地比例/%			
		耕地	林地	牧地	其他	耕地	林地	牧地	其他
1	2863.3	1181.5	402.3	350.8	928.7	41.3	14.1	12.3	32.4
2	7175.2	2275.2	2355.3	1626.7	918.1	31.7	32.8	22.7	12.8
3	6524.2	2064.1	1472.7	648.0	2339.4	31.6	22.6	9.9	35.9

表6-16　黄土高原几个地区农业产值结构

地区	农业总产值/亿元	各类产值/亿元				占总产值/%			
		种植	林业	牧业	副业	种植	林业	牧业	副业
1	10.04	7.38	0.68	0.34	0.34	73.6	6.7	16.3	3.4
2	17.42	11.93	1.92	2.47	1.09	68.5	11.0	14.2	6.3
3	30.36	20.16	2.50	4.60	3.06	66.4	8.2	15.2	10.1

粮食作物是种植业的主体，占总播种面积的83.2%。在作物结构上温（秋杂粮）凉（小麦）并重，喜凉作物已不占优势，小麦约占18%，莜麦、青稞已属少见，而喜温的玉米、谷糜、高粱大致占总播种面积半数，是我国谷糜、高粱集中产区。水稻只是在水源较为充足的地方有少量栽培。在作物分布上，本区的东北部以秋杂粮（玉米、谷子、高粱）占绝对比重，小麦有小面积种植，且无冬小麦，向西南则小麦比重逐渐增加，冬小麦取代了春小麦。在丘陵山区作物的垂直分布大致是下部川水地或阶地多玉米，稍靠上的坡地多种谷子，中上部则多小麦、马铃薯。

经济作物种植面积较少，占10.2%。主要为油料作物，占78%。油料作物主要有油菜、胡麻、向日葵等，花生、芝麻也有少量种植。其中，油菜生产广泛分布全区各地，辽西、内蒙古赤峰市和通辽市，以及大同盆地等处为春油菜产区，晋东南、渭北、陇东为冬油菜产区。胡麻主要分布于本区中部的晋北地区。此外，西辽

河流域和大同盆地的甜菜、渭北草原的烟草、辽西和渭北的棉花有一定的面积。

牧草、绿肥占比重小，不足 5%，以豆科为主，有紫花苜蓿、红豆草、沙打旺、草木犀、毛苕子、紫穗槐等。其中紫花苜蓿分布范围较广。

种植模式以单作一熟为主。除北部山区水、热条件好，可通过套种、复种，实行三年四熟或四年五熟制，复种指数达 105%～115%，全区复种指数约 101%。

6.4.1.2　农业结构调整态势和限制因素

（1）农业结构调整态势分析

我国大面积的旱作农业区，也是我国经济落后的农业区，长期以来迫于人口压力，盲目扩大耕地，形成以种植业占绝对优势的生产结构，林果业、畜牧业未得到应有的重视，农林产值结构畸形发展。原有的植被破坏不仅使水蚀、风蚀等土壤侵蚀加剧，而且对旱作农业区生态环境产生巨大影响，使干旱等气候灾害更加频繁。种植业结构陷入“越穷越垦、越垦越穷”的恶性循环，农、林、牧比例严重失调，深加工落后，不仅不利于旱区资源的合理利用，也不利于农业系统整体效益的提高。

在种植业中，粮食作物的比重占到总播种面积的 80%以上，而有助于良性循环的饲料作物和有助于扩大再生产资金积累的经济作物比重甚小。粮食作物的单一种植，不利于轮作倒茬，一些病虫害趋于严重。豆科作物的退缩，增肥措施跟不上，使地力得不到恢复，使土壤养分入不敷出，经济作物比重小，饲草面积过少，不利于增加农民经济收入，也限制了农区畜牧业发展。

商品性生产落后，是旱作农业区农业生产结构存在的现实问题，也是经济落后的主要原因之一。迫于人口压力，许多地方主要农产品尚不能自给，温饱问题尚未解决，成为全国重点贫困地区。因而，旱作农业区农业属自给性生产，无力扩大商品性生产规模，农产品商品率相当低下。加之旱区多处边远山区，交通不便，信息闭塞，产业落后，经济来源缺乏，人均收入远低于全国平均水平。

（2）农业结构调整的限制因素

从全国形势来看，改革开放以来，农村形势有了很大改变，农业产业结构也在发展中不断完善，不断地趋于合理，但是，现阶段我国大面积旱作农业区，由于其特殊的自然条件和地理位置，农业产业结构调整仍面临着一些困难和障碍。

一是产品单一化，适应市场难。随着城乡居民消费水平的提高，人们对农产品品种、品质、市场供应期提出了新的要求，而现在的产品单一化，并且大体上是供给滞后于需求的变化。表现为较高档次的农产品供不应求，部分大路货农产品又无人问津，生产难以适应市场需求变化。

二是农产品结构不合理，形成规模效益难。目前生产的农产品大多是一般产品，特色及优质产品少，原始或简单方式加工的粗产品多，而精加工的产品少，粮食作物多而经济作物少；小麦、玉米的品种高产的多而优质的少，蔬菜、水果种植面积大，产量高，而精品、名品少；名、特、优产品虽有发展，但没有形成规模

优势。

三是农村信息滞后，对农业结构调整发挥引导作用难。如何引导农民根据市场需求调整农业产业结构，准确可靠的市场信息十分重要。但目前农村有的地方农业产业结构调整趋同性倾向比较突出，市场信息不灵，缺乏对农产品市场信息进行科学的统计、分析、研究和报告，对主要的农产品的生产量、市场占有情况、消费水平、价格等不能进行及时、准确，可靠的统计预测，结果造成农业产业结构调整偏差，结构调整的目标不明确。

四是农业科技总体水平偏低，推动农产品商品化难。近年来，旱作农业区虽然引进了一批新品种、新技术、新成果，但与农业发达地区相比，在良种培育、引繁，新技术推广，新成果应用等方面还有一定的差距，远远不能适应农业生产发展和市场消费的需要。适用的新技术、新成果的推广缓慢，严重制约了农业产业结构向商品化、现代化迈进的步伐。

6.4.1.3 农业结构调整的意义和必要性

当前农业结构调整要解决的主要问题是，适应市场对农产品优质化和多样化的需求，提高农业和农村经济的整体素质和效益，增加农民收入。

在这种条件下，结构调整就不是简单的多种点什么、少种点什么的问题，而是要全面提高农产品质量和国际竞争力，全方位、大尺度地考虑农业产业发展、结构优化和地区布局，实现农业的可持续发展，实现城乡经济的协调发展，缩短中国农业与世界发达国家水平差距，促进中国农业产业升级和农业现代化的发展。

因此，当前的农业结构调整不是一般的适应性调整，而是一次具有全局意义的战略性调整。不仅要解决当前农产品“难卖”和农民增收的困难，而且要立足于农业和农村经济的长远发展；不仅要着眼于农业和农村自身发展，而且要考虑国民经济发展的全局；不仅要着眼于国内市场，而且要面向国际市场和世界经济贸易格局。

对我国农业结构进行调整，特别是旱作农业区农业结构进行全面调整，是由当前我国农业、农村经济发展所面临的形势决定的。

6.4.2 旱作农业区农业结构调整的基本原则和技术途径

6.4.2.1 旱作农业区农业结构调整的基本原则

“结构决定功能”，这是一切事物的普遍规律。农业系统内部结构的合理与否，直接影响其系统整体功能的发挥。发展现代农业，不仅取决于农村中的各项经济政策、良好的装备、先进的农艺技术，更重要的是要有一个科学的农业结构，才能有效地保证充分发挥农业系统的整体功能。合理的农业生产结构和种植制度，必须因地制宜，并具备三个条件：农业自然资源的适应性，科学技术条件的可行性，社会经济发展的一致性。在旱作农业区，调整结构、改进种植制度必须以发展高产、优

质、高效农业为方针，以合理利用水资源，提高水分利用效率为目的。按经济规律办事，绕筹规划，科学安排，从总体和全局把握以下原则。

（1）充分发挥区域资源优势

就客观规律而言，生态适应性决定了农业结构与种植制度改革的成败。在生态适应性中，包含着农业生物之间、农业生物与环境之间的适应性。其中，前者体现在农业生物群体之间的竞争或互补关系，后者则体现在农业生物种群与生态环境的统一性。调整结构、优化种植制度，其实质就是在特定生态环境中合理配置农业生物，以充分发挥资源优势，实现资源的高效和永续利用。

随着我国市场经济体制的建立和世界经济一体化发展，农业的区域分工和实行区域优势互补，已是降低农产品生产成本，提高市场竞争能力的重要手段。调整优化农业结构，必须在发挥区域比较优势的基础上，逐步发展不同类型的农业区和专业生产区。每个地区要以资源为基础，因地制宜，发挥本地资源、经济、市场、技术等方面的优势，发展具有本地特色的优势农产品，逐步形成具有区域特色的农业主导产品和支柱产业，全面提高农业经济效益。发挥区域资源优势，形成稳定农业结构，必须建立相适应的农产品转化龙头企业，使企业和农民形成利益共同体，做到市场需要什么，企业生产什么，农民就种植什么。建立农产品商品基地，使企业有原料，产品有销路，把农产品的生产、加工、销售等环节连成一体，实行企业连基地，基地带农户的产业化模式，以提高初级农产品的附加值，延伸农业产业链，提高农业整体效益。

（2）以市场为导向，坚持运用经济手段进行宏观调控

农业产业结构调整的最大推动力来自农产品市场，市场对农业产业结构的调整和优化将会起到先导作用。要根据市场需求，结合本地优势，培育和发展有特色的优势农产品，以优取胜占领市场。把建立、健全农产品市场体系，搞活农产品流通作为农民增加收入的重要环节来抓。同时发展外向型和高附加值农业，扩大农产品的对外需求，瞄准国际市场，使农产品通过竞争打入国际市场。逐步形成生产围着市场转，结构调整促增收的良性循环的新局面。

调整优化农业结构，不仅要瞄准社会对农产品多样化、多层次和优质化的现实需要，还要研究和着眼于潜在的、预期的市场需求趋势，以便在未来的市场变化中立于不败之地。要加强对市场的调查研究和宏观调控，建立反应灵敏的信息网络，逐步完善农产品市场体系。政府部门要根据市场供求变化，运用价格、税收、信贷等经济杠杆，通过调整产业政策和发布信息等手段，适时进行宏观调控，实现总量平衡，引导农民生产适销对路产品。

（3）依靠科技进步，提高农业综合生产能力

调整优化农业结构要充分依靠科技进步。要抓住改造传统产品和开发新产品两个重点，通过品种改良、高新技术的应用、科技成果的加速转化和农业劳动者素质的提高，推进农业结构调整优化。当前世界农业正在孕育着以生物技术、信息技术

为主要标志的新的农业科技革命，要抓住机遇，加快农业科技创新体系建设，促进农业结构调整优化和升级。

调整农业产业结构，关键要使农业科技转化为生产力。农业科技部门要加强科技攻关，加大农业科研、农技推广改革的力度。要重点在新技术、新方法上有关键性的突破，逐步建立具有世界先进水平的农业科技创新体系。不断培育出优质、高产的农产品品种，推广高产、高效的新技术，高效率、高效益地转化科研成果。依靠科技来推动农业增长方式的转变，使有限的资源发挥更大的作用。依靠科技，调整农业产业结构，还必须结合当地自然资源特点，特别注意提高区域综合生产能力。

我国北方旱作农业区降水有限，水资源数量少，作物水分亏缺量较大；降水季节分配不均，春旱十分突出；降水年变率大，季节变率也大，旱灾频率高；降水强度大，水土流失严重；蒸发量大，蓄水保墒艰难，地形破碎，水低田高，取用难度很大。于是，在调整结构、改革种植制度时，必须把挖掘降水生产潜力和提高水分资源利用效率作为重要的约束目标。在作物配置中，必须注重增加水分利用效率高、抗旱能力强的作物（如多年生豆科牧草），以及雨作同季的秋熟作物（如马铃薯、谷、糜等）。将不宜耕种的坡地退耕种草种树，降低坡地水分径流和水土流失。同时，还要纵观全局，特别要注意改善农业生产基本条件。严格保护耕地、林地，草地和水资源，防治水土流失。在不适宜耕作地区实行退耕还林、还草、还湖。保护生态环境，实行可持续发展。继续大力开展农田水利等农业基础设施建设，不断提高农业综合生产能力。

（4）在农民自愿基础上，坚持单项生产与综合生产相结合

广大农民是市场经济条件下调整优化农业结构的主体。要正确处理政府引导和发挥市场机制作用的关系。继续稳定党在农村的基本政策，切实尊重农户自主经营、自负盈亏的市场主体地位，把自主权真正交给农民。让农民按照市场导向作出自己的选择。各级政府要做好政策引导，信息服务，技术示范，市场预测，要搞好农业基础设施建设、市场信息体系建设、农产品质量标准制定等，创造宽松的社会经济环境，引导和支持农业结构调整顺利进行。

农业系统由种植业、林业、畜牧业、工副业、渔业等多个子系统构成；而种植业中又包括粮食作物、经济作物、饲料作物等生产项目。社会对农产品的需求也是多种多样的。单一化的生产结构不但不能满足国民经济发展和人民生活对农产品的要求，而且使农业生态系统稳定性降低，系统功能难以充分发挥，不利于资源的高产和持续利用。即使有专业化生产占优势的地方，诸如小麦生产基地、油料生产基地、苹果生产基地等，也不能只抓优势项目而忽视其他生产项目。在调整生产结构、安排作物布局时，应从社会需要与资源状况两方面考虑，既要发挥资源优势、突出重点，又要体现农业系统的整体性，使单项生产与综合生产有机地结合起来。

（5）立足宏观，面向世界，实现社会、生态和经济效益共同发展

评价一个地区农业生产结构与种植制度是否合理，一般从社会效益、经济效益和生态效益三大效益来考虑。一般来说，国家或地区的政府部门对农业结构和种植制度的社会效益比较重视，他们要求农业能够提供满足社会需要的足够数量的农副产品，要求农业能为全社会及其他行业提供劳力、资金与市场等；对于农民来说，经济效益的高低更为重要，他们在选择产业结构与种植比例时，特别注意不同农产品的经济效益，比较利益原则是他们进行决策的基本原则；对于科研人员来说，他们对生态效益相对比较重视，他们更多地考虑农业生产结构与种植制度对自然环境的适应性和对生态环境可能造成的影响。所以在调整结构、改革种植制度时必须协调好不同阶层的利益关系，做到三大效益的同步发展与提高。

6.4.2.2　旱区农业结构调整的技术途径

（1）合理利用土地资源，促进农林牧综合发展

旱作农业区自然条件极为复杂，地形有高原、盆地，也有山地、丘陵沟壑及风沙滩地，气候有寒冷干旱、温凉干旱、高温旱燥等类型，不同地区的土壤类型也是多种多样的。为了充分挖掘不同类型地区的资源生产潜力，必须因地制宜，发挥优势，对土地资源进行科学规划，合理利用，促进农林牧的综合发展和生态环境的改善。

关于农林牧的结构问题，不同生态类型地区就有不同的侧重点。东北的西部，河北的坝上、山西的雁北、陕西的长城沿线及内蒙古的中西部等地区，属于风沙旱滩生态类型区，应以发展草业为主，加强人工草场建设，增加畜牧业收入；适当发展林业，以防护林为主，保护土地；耕地面积不宜过大，应着重培肥地力，增加投入，提高单产，实现粮食自给。晋北、晋东南及晋西的山地、陕北的黄土丘陵沟壑区、陇中的墚状丘陵沟壑区及青海的浅山地区，属于墚峁沟壑及浅山生态类型区，应通过建设基本农田、培肥地力、推行蓄水保墒耕作技术等途径，解决粮食自给问题；在少种高产多收的前提下，把不适于耕种的陡坡地退耕种草种树，尽快恢复植被，控制水土流失；适度发展牧业、林果业，以增加农民经济收入。陇东黄土高原、渭北高原、渭北台塬及秦岭北坡、太行山麓等处的塬地和阶地，属于高原沟壑生态类型区，应在塬面宜农耕地发展粮食和经济作物，治理开发沟坡，发展果林业生产；利用荒沟、荒坡、荒山等种植牧草，发展畜牧业生产，建立以农为主、农牧结合、农牧果林综合发展，粮、畜及多种经营的商品生产基地。同时，要大力推进农业由粗放经营向集约经营转变。多数旱作农业区的农业比较粗放，这不符合人多地少的基本国情。只有把有限的资源充分利用起来，才能增加农民收入，走可持续发展的道路。

土地是农业的基础，保护土地，培肥地力是农业持续发展的重中之重。旱作农业区坡耕地占 65%以上。夏秋雨水集中且多有暴雨的气候特点使坡耕地的蓄墒率低下，十分有限的天然降水携带着宝贵的土壤有机质和矿质营养化作径流移出农

田，造成水土流失。对此，大力建设梯田、条田、坝田、水地等基本农田，变“三跑田”为“三保田”，将能有效地改善农田水分状况，为旱地的持续增产奠定基础。

在丘陵沟壑和山地区，如果没有一定数量的基本农田做保障，则难于彻底摆脱广种薄收局面，种草种树也只能是一句空话。此外，在旱作农业区积极推行深松耕、水平沟种植法、坑种法、沟垄种植法、覆盖耕作法和机械沟播等保护性耕作技术，也可显著增加土壤蓄水，降低水分散失。已有研究证明，干旱固然是旱作农区农业生产的经常性威胁，然而地力不足导致自然降水大量地无谓地损耗，是丰富的光、热资源转化效率低下的最直接的原因，培肥地力是开发农田降水生产潜力的关键。

旱作农业区培肥应坚持“有机为基础、有机不足无机补”的原则。通过调整种植业结构。适当压缩粮食作物播种面积，扩种具有广泛生态适应性、生产性能稳定、水分转化效率高的多年生豆科牧草——紫花苜蓿，发展畜牧业，使苜蓿所固定的生物氮素连同有机质经过畜牧业的渠道以有机粪肥的形式进入农田，强化农牧结合与土地用养结合，建立“草-畜-肥-粮”良性物质循环体系。适于北方旱区的有机培肥途径还有粮豆轮作、翻压绿肥和秸秆还田等。在有机培肥的同时，还应注重现代重要农业要素——无机化肥的投入，以拓宽农业系统的物流量。达到农田养分平衡，提高降水利用效率。

（2）建立区域商品生产基地，发展效益型农业

发挥资源优势，因地制宜地建立不同类型农业商品生产基地，对于发展旱作农业区效益型农业具有重要的战略意义。例如，风沙旱滩类型区和丘陵沟壑浅山类型区可发挥土地资源广阔的优势，建成优质饲草生产基地和畜牧业商品生产基地；同时，这些地区还具有发展胡麻、向日葵、甜菜等经济作物，谷糜、荞麦、马铃薯等秋杂粮作物，以及大枣、沙棘等耐旱果树的优势。在南部的旱塬类型区，可利用水热条件较好、耕地平坦且土壤肥力相对较高的优势，建成以小麦为主的粮食和油菜、棉花、烟草等经济作物商品生产基地；还可利用沟坡、塬边和山地建立苹果、梨、杏、柿子、核桃等林果商品生产基地。通过对不同地区优势农产品的重点开发，提高其商品率，将能有效地增加农民的经济收入，为旱作农业区的脱贫致富和农业持续发展奠定基础。

区域农业商品基地建设要大力推进科教兴农，使农业的发展尽快地转到依靠科技提高质量为核心的轨道上来。高度重视农业科技进步，选育和普及优良品种，推广先进实用技术，大力提高农产品质量和农业科技含量。

区域农业商品基地建设，要大力推动农业生产的广度和深度发展。按照市场的要求，实现农业内部各行业和各产品之间合理的比例关系，比如粮经（粮食作物与经济作物）比例、种养（种植业与养殖业）比例、农村一二三产业的比例等，充分发挥各地农业的比较优势，发展产业化经营，使更多的农产品加工转化、增值，提高农业经济效益和增加农民收入。通过多种途径转移农村富余劳动力，扩大就业空

间，拓宽收入来源。通过农业结构调整，逐步建立适应社会主义市场经济体制的农村经济运行机制。新阶段农业要适应市场的变化，按计划经济的办法不行，要尽快建立适应市场经济的运行机制。尽快研究解决如何使旱作农业区 2 亿多农户这个市场主体了解市场、进入市场的问题。

6.5　耐旱节水高产良种的选用及品种搭配

在旱农地区选用农作物品种和栽培技术要因地制宜，根据各地实际情况而定。

6.5.1　选用与当地自然和生产条件相适应的品种

在选用抗旱作物及品种时，要注意品种的地域性、时间性及与良法配套的特点，要结合当地自然条件，尽可能使作物生育期与当地水、肥、气候条件相适应。要选育和种植适应当地环境条件、技术水平，特别是符合当地降水规律和土壤肥力的高产、优质、抗逆性强的作物和品种，并建立、健全旱农地区的良种繁育体系，在繁殖正规良种的同时，还应重视应急品种的储备。

6.5.2　注意提纯复壮当地品种

北方旱农地区的地方品种是长期自然选择和人为选择的结果，是最适应当地环境条件的，因此，旱农地区的地方品种都是比较抗旱的品种，在特别干旱的年份也不会绝收，只是产量较低。地方品种由于长期种植，混杂严重，必须注意提纯复壮工作。特别是地方品种在品种结构的搭配上或作为抗旱育种的亲本上都有一定的利用价值。

6.5.3　制定适应的种植制度

种植制度中选用的各种作物应有主有从，切忌单一化；要瞻前顾后，用地养地结合，使旱农地区瘠薄的地力得以提高，保证增产有可靠的地力基础；要因地制宜调整作物布局，安排好轮作倒茬，以充分发挥抗旱作物和品种的作用，利用当地农业资源，产生最佳的经济效益、生态效益和社会效益。

6.5.4　注意开发和利用水资源

采用适合当地情况的土壤耕作措施、休闲制度、种植方式以及集水保水措施，以保蓄天然降水，防止水分无效地大量消耗；要尽可能利用当地的有利条件，实行增墒灌溉，使当地可利用的水源都能为旱农生产所利用。

6.5.5　合理配置作物品种

在选择作物和品种配置时，要注意高秆作物与矮秆作物的搭配，株型紧凑与株

型较松散作物的搭配，喜光作物与耐阴作物的搭配，耗氮作物与固氮作物的搭配，同时，注意作物的共生期和成熟期的表现。不断培肥地力，以充分发挥天然降水和土壤蓄水及供水的生产效果，提高水分利用率。

6.5.6 提高作物播种质量

适期播种，抗旱播种，趋利避害，充分发挥水资源的生产潜力；适量播种，建立与降水和地力水平相适应的群体结构；采用相应的播前播后土壤耕作措施，保墒提墒，为种子发芽创造条件，力争苗全苗壮，为获得丰产打好基础。

6.5.7 及时管理、适时收获

必须抓紧时机进行间苗、定苗、中耕、追肥、除草、防治病虫兽害，要不失时机地经济利用水分，防止水分无效消耗。抓住作物成熟的适宜时期及时收获，力争丰产丰收。

参 考 文 献

[1] 李岗等. 渭北旱地小麦不同产量形态生理指标及调控技术研究 [J]. 干旱地区农业研究，1997 (2)：15-19.
[2] 冷石林，韩仕峰等. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术 [M]. 北京：中国农业科技出版社，1996：207-308.
[3] 黄明镜等. 地膜覆盖条件下旱地冬小麦的耗水特征 [J]. 干旱地区农业研究，1999 (2)：23-26.
[4] 李友军等. 旱地小麦抗旱播种方式研究 [J]. 干旱地区农业研究，1997 (1)：21-26.
[5] 张正斌，山仑等. 降水因子与小麦产量最优回归模型的探讨 [J]. 水土保持通报，1996 (4)：14：31-34.
[6] 陈培元，李英等. 黄土旱塬冬小麦反应型丰产模式研究 [M]//中国科学院资源环境局. 黄土高原小流域综合治理与发展. 北京：科学技术出版社，1992：503-520.
[7] 王怡等. 冬小麦陕229在旱地不同施肥水平的水分利用效率研究 [J]. 干旱地区农业研究，1999 (3)：35-39.
[8] 李鼎新，党增春，徐学选. 宁南黄土丘陵区春小麦丰产施肥模式研究 [J]. 水土保持通报，1995 (5)：29-34.
[9] 贾振华. 施钾对提高小麦籽粒产量和蛋白质含量的初步研究 [J]. 北京农学院学报，1992，7 (1)：5-15.
[10] 王渭玲，张冀涛. 旱地分期施用氮肥对小麦产量和品质的影响 [J]. 干旱地区农业研究，1996 (2)：41-44.
[11] 张保军，吕家龙，王建民. 渭北旱塬不同类型小麦产量结构初探 [J]. 西北林学院学报，1998，13 (2)：61-64.
[12] 吕家珑，张保军，李松龄. 施肥对旱地冬小麦水分利用率和产量的影响 [J]. 西北林学院学报，1998，13 (2)：56-60.
[13] 张保军，扬文平，王银银. 穴播地膜小麦土壤水分动态变化研究 [J]. 西北农林科技大学学报，2001，29 (4)：68-73.
[14] 张保军，韩海，朱芬萌. 地膜小麦土壤温度动态变化研究 [J]. 水土保持研究，2000，7 (1)：59-62.
[15] 陈书田，郑新利. 不同耕作方式对土壤水分含量及利用率的影响 [J]. 安徽农学通报，2008，14 (18)：60-61.
[16] 刘晓宏，肖洪浪，赵良菊. 不同水肥条件下春小麦耗水量和水分利用率 [J]. 干旱地区农业研究，2006，24 (1)：56-59.
[17] 王敏，党建友，张定一等. 大旱之年小麦地膜覆盖增产效果的研究 [J]. 山西农业科学，2010，38 (2)：57-59.

[18] 郑家国，张鸿，姜心禄等．多熟制条件下节水抗旱农作模式的水分利用率研究［J］．西南农业学报，2006，19（6）：1039-1043.
[19] 李志军．旱地冬小麦膜沟栽培水分利用率研究［J］．中国农学通报，2007，23（5）：207-209.
[20] 梁志刚，高秀萍，宋志辉，旱地小麦喷施绿色抗旱剂技术及节水效应研究［J］．中国农学通报，2006，22（9）：487-489.
[21] 邓振镛，张强，王强等．黄土高原旱作区土壤储水力和农田耗水量对冬小麦水分利用率的影响［J］．生态学报，2010，30（14）：3672-3678.
[22] 张文娥，魏永霞，王超．节水抗旱集成技术对土壤水分及大豆产量的影响［J］．灌溉排水学报，2008，27（3）：100-102.

第7章 作物品种资源节水途径与技术

干旱缺水是伴随生物进化过程最主要的胁迫因素之一，也是人类生产活动中经常面临的不利环境之一。作物在经常遭遇的干旱环境中生存繁衍，因而，节水耐旱性是作物进化的基本而重要的适应性之一。旱生作物具备特有的节水器官、耐旱生理性能和生态反应机制，是在干旱环境胁迫和人类选择共同作用的结果。

7.1 作物抗旱的基本机理与类型

作物抗旱性一般是指作物适应和抵御干旱的能力，也就是作物在土壤和大气干旱条件下生存和形成产量的能力。

作物抗旱性一般分为避旱和耐旱两种类型。在自然状态下，大部分作物仅以耐旱适应为主，小部分有避旱功能，还有一部分则避旱和耐旱兼而有之。一些长期生长在特殊旱境（如沙漠或季雨地区）中的植物具有很强的自主避旱能力，它们能够利用生长节奏来调整生育期，而使自己的需水敏感期躲过旱期或旱季。在人工栽培条件下，作物的自主避旱能力相对弱化，人类可以利用作物品种布局、调整种植季节或播种期以及其他一些栽培措施，使作物生长在相适应的环境和时期。干旱半干旱地区，人们普遍重视耐旱作物的利用，并使之与高产性等其他优良特性相结合，不断提高作物的生产能力。

虽然植物种类不同，耐旱机制多样，但大多数耐旱农作物在形态特征、组织结构、生理特性等方面都有较多的共同之处。从形态特征来看，根系发达，活性强，生长快，入土深，根冠比大，奠定了充分利用土壤水分的基础；相反，地上植株生长缓慢，体积缩小，叶面积显著减小，角质化程度较高或有较厚的蜡质层，能够降低蒸腾耗水的绝对量。叶脉致密，输导组织发达，利于体内水分运输和物质交换；叶片气孔多，水分供应不足时气孔关闭相对迟缓，利于叶片降温和维持较多的光合时间；叶片细胞较小，高分子亲水物质多，亲水胶体含量高，原生质黏性大，可以阻止细胞组织迅速脱水等等。

作物耐旱性的上述表现有两种情况，一种是作物类型或品种具备适应旱作条件的器官和能力。这些耐旱的特征特性经过自然和人工定向选择，已被固定于作物遗传性中，在全生育期内综合表达，在干旱胁迫时忍耐力强，调节幅度大，受害反应迟钝、轻微甚或不受伤害。另一种情况则是非耐旱作物或非耐旱品种在干旱来临时的应激反应。尽管它们会显现一些上述相似的表达，但由于选择进化方向有所不同，已在种性上导致了耐旱性的弱化，故对干旱胁迫条件的反应比较强烈、敏感，

自我调节幅度很小，忍耐力有限，在同等程度的干旱条件下往往受害严重乃至致死。

中国是一个有着几千年农耕传统和作物栽培历史的农业大国，更是一个水资源贫乏并饱受旱害之苦的以旱作农业为主的国家。据统计，中国陆地淡水量在全球各国属于中下水平，人均占有量不足世界平均值的 1/4。中国关于旱灾的记载始于商代（公元前 206 年），至 1949 年的 2155 年中，旱灾记载多达 1000 余次，几乎是两年一旱。建国以后的半个世纪，中国比较严重的旱年有 17 个，因旱受灾农田面积占全部自然灾害的 58%，是涝渍成灾面积的 2.2 倍，因此，中国农民不仅积累了比较丰富的旱作经验，创造了较多的节水栽培技术，中国也是世界著名的作物起源中心之一，作物种类及其变异类型繁多，种质资源相当丰富。水稻、小麦、谷子、糜子、高粱、荞麦、大豆、小豆、豇豆、油菜等众多农作物以及数十种蔬菜和几十种果树，都起源于中国，并在适应干旱条件中产生了众多的抗旱品种类型，成为全世界称著的抗旱作物重要的基因库。

7.2　耐旱作物品种资源与节水栽培途径

7.2.1　小麦

7.2.1.1　世界小麦生产利用概况

小麦（*Triticum. aestivum*）是世界第一大粮食作物，供全球 1/3 的人口作为主食。小麦种植分布极广，北到北纬 67° 的北欧，南至南纬 45° 的阿根廷，全球面积约 2.3×10^8 hm²，1995 年以来年总产量已逾 5.8 亿吨，约占粮食总量的 27%～30%。小麦种植面积超过 1×10^7 hm² 以上的国家有中国、美国、印度、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、法国等。中国总产第一，20 世纪 90 年代以后，年产已超过 1 亿吨；法国单产最高，平均可达 6000kg/hm² 以上。小麦也是世界最重要的商贸交易农产品之一，年贸易量约 1.2 亿吨，其贸易量和贸易额均超过所有其他谷物的总和。主要的小麦出口大国有美国（33%），加拿大（20%），澳大利亚（10%）、阿根廷（6%）以及以法国小麦为主的欧共体（20%）；主要的小麦进口国有俄罗斯、中国、日本、埃及、巴西等。

7.2.1.2　中国小麦品种与生产发展状况

中国小麦面积仅次于水稻。建国 60 余年来，全国小麦种植面积从 1950 年的 1890 万公顷逐步扩展，后面结构调整、面积有所下降。到目前大约是 2300 余万公顷，平均单产水平从当时的不足 750kg/hm² 提高到现在的 4770kg/hm² 以上。

中国小麦种植遍及全国，共有 10 大麦区。降水比较充沛的华南（年降水 1000～2400mm）、西南（年降水 900～1300mm）和长江中下游（年降水 770～1480mm）三个冬麦区的种植面积仅占全国小麦总面积约 1/4；地处中国北方和西

部的其他7大冬、春麦区多属干旱半干旱地区，年降水量从不足100mm（新疆、西藏的部分地区）到900mm，大部分在300～600mm之间。1950～1982年的32年间，中国育成小麦品种927个，其中抗旱耐热品种298个，约占32%；从南向北，各麦区耐旱品种的比例分别为9%（华南、西南和长江中下游三大冬麦区）、34%（黄淮冬麦区）和45%（东北春麦区、北部冬春麦区、西北春麦区、新疆冬春麦区）；以旱作小麦为主的省区，其抗旱品种所占比例更大：内蒙75%，山西72%，陕西58%，甘肃50%，新疆72%。由此可见，小麦耐旱品种在中国小麦育种和生产中占有举足轻重的位置。从我国第六个五年计划开始，全国组织了有计划的小麦育种攻关研究，每五年育成小麦品种均在80个以上，但耐旱品种的比例逐渐下降，至九五期间已不足10%。陕西省自六五计划以后的20年内育成小麦品种85个，耐旱品种仅22个，比例已降至25%以下。建国以后的前30年，几乎所有小麦品种都具有一定的耐旱性能，包括湿润地区和灌区利用的品种，而在品种不断改良、生产不断发展的后期，这种普遍需要的抗逆特性逐渐被减弱，部分适灌品种和高产品种几乎不具备耐旱能力。这种变化，一方面说明中国农田灌溉条件与技术不断进步，另一方面也应该承认，抗旱农作物及其耐旱品种资源的利用在人们追求高产再高产的倾向中有所轻视和放松。

7.2.1.3 小麦耐旱性研究

小麦耐旱性是我国乃至世界农业科学家关注并持续研究的课题。截至目前，人们从形态特征与结构、遗传表达、生理特点、生态反应、鉴定选择方法等各个方面都进行了不同程度的探索，人们的认识在不断深入和全面。

① 耐旱小麦的形态与发育特征　纯旱作冬小麦一般耐寒、耐旱、耐瘠三位一体，密切相关，有时也与耐盐渍相伴，其形态特征大同小异，根系下扎深而快，次生根多，冬前下（根）快上（苗）缓，盘根大；越冬期幼苗壮实，分蘖偏多、长势稳健；春季返青早，大、小蘖两极分化迅速，成穗率高；植株相对偏高，旱缩率小，秆偏细而韧性较好，穗下茎节长；叶片较细长，叶色先深（苗期）后浅（成株期），中期繁茂披垂，遇旱翻卷或下垂，萎蔫迟，不失绿或慢枯黄，遇雨墒恢复快；多穗型结构，穗纺锤形，小穗着生偏稀，籽粒中等或偏小，种皮薄。粒库弹性高（粒库弹性＝千粒重变异系数/籽粒饱满度平均级数）。春麦区耐旱型春小麦的表现多为中高秆，茎秆细韧，叶片小，多被绒毛，根系发达，分蘖力强，成穗数较多，结实率高，颖壳口紧不易落粒、绿叶期长等。而东北春麦区品种的耐旱性则主要表现在苗期。

② 耐旱性遗传与育种　耐旱小麦品种形态特征和生长发育特点，实际上是耐旱小麦的基本遗传性与环境相互作用的生态反应，人们更为关切和需要的是耐旱性与高产性的结合与统一。通过对同时关系到抗旱与高产的几个主要性状进行遗传研究表明，在旱地条件下，单株产量、穗节长度均表现完全显性和超亲优势，且遗传力强，变异系数大；穗粒数具有一定超亲优势，但遗传力弱、变异系数小；株高表

现完全显性，遗传力较强，变异系数甚小。旱/旱、旱/水、水/水 3 类杂交组合中，旱/水类型组合性状的遗传力强，变异系数大，应作为耐旱品种选育的首选组合方式。众多的小麦抗旱育种实践证明，尽管耐旱与高产两性状多处于矛盾之中，但结合与统一在人们不断撮合中发生着渐变和提高，从而产生多种性状组合的中间类型。这不仅对于耐旱品种提高产量，而且对于高产品种恢复和增加耐旱性都具有积极意义。

③ 耐旱生理生化机制　耐旱品种多表现叶片细胞小而多，叶绿素含量相对高，相对含水量小，水势高，细胞浓度大，叶片饱和水亏小，在干旱胁迫时，可溶性糖和脯氨酸含量均相对高。气孔扩散阻力加大，细胞膜渗透性变小，渗透势降低，渗透调节能力增强，呼吸强度减弱，光合强度不减或缓减等等。人们进行生理生化指标的动态测定和比较研究，不仅仅在于揭示耐旱性在小麦体内的微观表现和生长发育过程中的动态变化，更重要的目标是寻找一个（批）真实可靠又便于操作的生理生化选择指标，从而使人们对耐旱性的鉴定选择更科学也更准确。

7.2.1.4 小麦抗旱栽培技术

① 选用耐旱品种　选用耐旱品种应注意掌握四条基本原则。一是坚持以稳产定品种，在追求耐旱与高产之间，首选耐旱性，在此基础上考虑产量潜力；二是坚持旱（灾）年定品种，自然鉴定和恶劣气候考验结果最具有应用价值；三是坚持就地定品种，当地育成品种和经过当地试验种植而被认可的品种才具有较高的保险系数；四是坚持合理搭配品种，在重视品种自身多种抗逆性（抗倒伏、抗病虫等）结合的基础上，坚持多个耐旱品种的搭配，一个地区一般不要单一利用一个品种。

② 蓄水保墒　平整土地，修坝护坡，减少水土流失；营建农田防护林网，植树种草，防风固沙，减少土壤风蚀。同时，旱地冬小麦休闲期多在雨季，应及早深耕晒垡（歇地），并根据降雨情况选择多次浅耕，休闲后期多次耙耱，较大程度地减少蒸发，蓄集降水。春小麦休闲期多在深秋至早春期间，有较多雨雪（较长期的白雪覆盖），早春及时顶凌耙耱保墒。

③ 培肥地力和科学施用化肥　有机质含量高的田块，土壤质地疏松、通气性强，蓄水保墒好，有利于作物根系生长。有机质也是作物生长所需营养的主要来源之一，它们通过缓慢分解，不断释放易被作物吸收的 N、P、K 及其他微量元素，逐渐提供作物利用。根据测定，土壤有机质含量 1%以上的旱地，每毫米降水可生产小麦 0.68kg，但有机质含量 0.5%以下的瘠薄地仅生产小麦 0.26kg。利用豆类作物和豆科绿肥、牧草等轮作倒茬，绿肥养地，长期持续施用有机肥、长期持续秸秆还田等措施，都能提高或保持土壤有机质水平，增加土壤肥力，提高土壤保水能力和水分利用率。

科学使用化肥也是培肥地力和进一步提高小麦生产力的重要措施。所谓科学施肥，首先是分清水、旱。灌溉小麦可将总肥量分成不同比例，在各生育期多次逐施，旱地小麦则需要全数用作底肥一次施下；因怕缺墒烧苗，故在旱作条件下不推

荐施用种肥。其次是正确选用化肥类型，如底肥宜选长效缓效全价复合肥、追肥宜选速效尿素、旱地施用碳酸氢铵的效果好于尿素等等。第三应注意氮、磷、钾肥及其他一些微量元素化肥的科学搭配，实行测土平衡施肥。应根据目标产量指标、土壤中已有养分以及选用化肥成分及其营养元素含量等因素，坚持缺啥补啥、缺多少补多少、不缺不补的原则，计算肥料施用数量。一般按照每生产 100kg 小麦籽粒，需从土壤中摄取 N、P_2O_5、K_2O 约为 3kg、1kg、2.5kg 计算施肥量。同时注意产量提升与施肥的关系。

④ 精细播种　旱地小麦的播种非常关键，重点掌握播期、播量和播种方法。在最佳播种期内，可根据实际情况灵活掌握使用“借墒不等时、到时不等墒”策略。旱地小麦播种量一般较水地要大。旱地冬小麦的稳产结构一般为（400～550）万穗/hm^2×(25～30)粒/穗×(35～40)g/千粒，按照单株成穗 1.5～2 个计算，播量应控制在 100～200kg/hm^2 之间；春小麦要求单位面积成穗数略高，一般为 450～560 万穗/hm^2，单株成穗 1 个左右，播量宜控制在 225～275kg/hm^2 之间。冬小麦播种深度略大，可达 3～5cm，墒情好可取上限，墒情差宜取下限；春小麦需浅播，入土深度 2～4cm 即可。大旱之年土壤墒情不足，传统旱作小麦栽培中实施播前和早春碾压，这是抗旱提墒的好措施，对于保证出苗率和促使早返青、早分化都十分有利。

7.2.1.5　小麦节水栽培技术

① 秸秆覆盖　利用作物秸秆覆盖土壤表面，可减少阳光对地面的直接照射而有效减少土壤水分蒸发，也能减少地表雨水径流和风蚀，从而达到蓄水保墒的效果。一般采用两种方法实施分段覆盖：一种是播前覆盖，可在小麦休闲期采取不翻耕先覆盖的方法，在小麦播种前一次性翻耕整地；另一种是播后覆盖，即在小麦播种后利用麦糠或粉碎（铡短）的秸秆覆盖麦田。这两种方法比较省工，便于实施，但均为部分作用，效应不全。西北农林科技大学在陕西省合阳甘井试验区研究旱地小麦覆盖技术，总结出了“高留茬少耕全程覆盖技术”，就是在小麦收割时高留茬 10～15cm，小麦收获后地面覆盖麦草 9000～10000kg/hm^2，小麦播种前先集草后耕整，播种后再将所集之草原覆地表拍实。经测试：该技术比传统抗旱耕作方法自然降水保蓄率从 25%～35%提高到 50%～65%，公顷增蓄水分约 600～1200m^3，相当于多降雨水 60～120mm。5 年试验平均产量高达 6526kg/hm^2，每公顷增产 3414kg，增产幅度为 109.7%。由于每年覆盖，不仅增加了土壤有机质，还提高了土壤肥力，改善了土壤理化性质，增加了小麦产量。值得注意的是，秸秆覆盖容易引起病虫害，如小麦白粉病、地下害虫等，应与土壤灭虫、选用抗病品种、实施化学防治等措施相结合，效果会更佳。

② 地膜覆盖　旱地小麦覆膜栽培一般有两种形式，一种是膜上打孔穴播法，其优点是地膜覆盖面大，保水提温等作用及增产效应十分明显；另一种是膜侧条播法，多采用宽窄行，宽行成垄覆膜，窄行成沟播种。旱地小麦覆膜栽培技术增产效

果明显，但其中一些技术环节和认识误区需要引起注意，更须在继续探索研究中解决和完善。首先是适用性区域问题，在热量、降水等矛盾并不十分突出的地区，在产量水平已经很高的地区，在沙壤、砾石以及瘠薄田块等等，地膜覆盖栽培的增产效果都不十分明显，甚至会出现减产负效应。其次是技术设施的全面配套问题，地膜覆盖要求更严格、细致，技术更规范、精准。必须针对本地小气候特点选定最佳配套方案如覆膜方式、机具、品种、播期、播量、施肥、耕作、管理措施等等。第三，在黄淮麦区，旱地小麦覆膜后，往往出现后期晚熟青干现象，陕西关中的熟前高温逼熟更为普遍。第四，覆膜后虽然减少了蒸发，但天然降水也进入不了土壤，造成了径流和膜外集水蒸发的浪费，如果能使旱地冬小麦生育期内长达 9 个月、春小麦 5～6 个月的天然降水全部下渗，或者能解决覆膜小麦适当补灌的技术问题（如膜下渗灌等），必能使地膜小麦的效应再上一个台阶。第五，地膜残留回收问题，已成为一些地区持续推广该技术的一大障碍。解决以上问题是地膜覆盖栽培小麦持续发展的关键。

7.2.2 谷子与糜子

谷子（*Setaria italica*），又称粟、小米，禾本科狗尾草属一年生草本作物。

糜子（*Panicum miliaclum L*），古称黍、稷等，禾本科黍属一年生草本作物。

7.2.2.1 分布、生产与利用

谷子和糜子都是喜温耐旱作物，适应生态环境及所需生产条件相似，故往往在同一地区相伴种植。全世界主要分布在亚、欧、美三大洲的干旱半干旱地区，主要的种植国家有中国、印度、朝鲜、日本、蒙古、俄罗斯、法国、澳大利亚、美国、加拿大、匈牙利等，目前总面积约 800 万公顷，其中糜子近 600 万公顷。

中国是谷子和糜子的起源中心，起源地在中国北方黄淮流域，该地区的种质资源和品种类型都十分丰富。中国目前保存和利用的两作物种质资源总计约 3.4 万余份，其中以谷子为多，约 26500 余份，糜子 7500 余份。中国也是谷糜生产大国，种植面积占全球 80%以上。20 世纪 80 年代之前，中国种植面积维持在 600 万公顷左右，之后随农业条件的不断改善和农业结构调整而逐年下降，目前种植面积仅约 220 万公顷，其中谷子 140 万公顷。谷糜主要分布在东北、华北、西北一些省区的干旱缺水地区。谷子种植地区相对集中，多在中国北方，而糜子的种植遍布全国，从海南（琼州）到内蒙（海拉尔），南北跨 30 个纬度，东西跨 67 个经度。

中国近年年产谷糜约 3.7 亿千克，为全球之首，但由于多为旱作，谷糜单产一般比较低下，而且省区间产量差异非常悬殊。谷子单产在山东省平均达 4119kg/hm^2，甘肃省平均 1500kg/hm^2 左右，而在陕西仅约 850kg/hm^2。糜子在内蒙古（准格尔）、陕西（府谷）、山西（河曲、保德）等地，均产可达 4500～6000kg/hm^2，但在全国平均单产仅 1100kg/hm^2 左右。

谷糜是颇具特色的人类食粮和畜禽饲料。与小麦、水稻（大米）、玉米等主要粮食相比较，糜子的粗蛋白含量和小米的植物油含量都远远超出，8 种必需氨基酸、有益于人类健康的重要维生素（A_1、B_1、B_2、E 等）以及参与人体生命活动代谢的重要矿物质营养（Fe、Zn、Cu、Mg、Se 等）都比几个主食更优更全，所以，小米是人们公认的孕（产）妇和儿童、老人的营养食品，糜子也是中国古代就已开发利用的保健食粮，具有补中益气、健脾益肺、清热愈疮等功效。20 世纪 70 年代之前，谷糜是中国北方干旱半干旱区域的主栽作物，也是当地人们的主食。现在除部分用作营养食品和饲料外，每年约有 200 万吨用于出口，其换汇价格高于上述三大作物。另外，谷糜秸秆、壳糠等副产品也是牲畜优质饲草，其饲用营养价值也优于其他禾谷类作物。

7.2.2.2 基本特征特性

谷子、糜子产量潜力不亚于旱地小麦等主要农作物，其耐旱和耐瘠薄的能力却在一些地区表现更为优越。

谷子、糜子均为须根系，根量大而发达，可扎深至 200cm 以上，且能根据生长条件和作物需要而从秆基部着生支持（气生）根，不仅能起抗倒伏作用，也可加强水分和营养的吸收能力。

谷子、糜子叶面积较大，叶片薄而下披，表皮细胞壁厚，内含大量硅素，气孔多，叶脉密集，疏导组织发达，叶、鞘被茸毛。谷子和糜子的叶片能耐受 40℃以上大气高温，水分利用效率较高。谷糜面对温度的剧烈变化和高温条件，蒸腾调整幅度较大，而光合反应比较迟钝。

谷、糜均为短日照作物，也都为短生育期作物。相对而言，谷子对光照反应较糜子敏感，积温要求略高（谷子 1600～3000℃，糜子 1200～2600℃），因而生育期也略长（谷子 60～150 天，糜子 50～130 天）。

谷、糜株高一般在 60～150cm 之间。谷子单茎无蘖，茎粗而脆，糜子则有分蘖习性，最多可达 20 个以上，且再生能力极强，这一特性常能减轻或弥补冰雹等灾害造成的农业生产损失。

7.2.2.3 抗旱栽培措施

① 选用品种　目前生产推广的春谷新品种有中熟耐旱品种“晋谷 45 号”、晚熟高产品种“晋谷 27 号”，适于东北种植的中熟品种“辽谷一号”“朝谷 13 号”，晚熟高产品种“龙谷 30 号”、“九谷 10 号”等；夏谷新品种有“谷丰 1 号”、“谷丰 2 号”、“鲁谷 10 号”、“豫谷 14 号”、中早熟糯质品种“懒谷 3 号”“冀特 20 号”等；春糜品种有“年丰 6 号”、“龙黍 22 号”、“晋黍 3 号”、“内黍 3 号”、“内糜 5 号”、“陇糜 4 号”、“宁糜 9 号”等，夏糜品种有“榆黍 1 号”、“榆糜 2 号”等。引用品种时要注意避免两种人为倾向，一是过分追求高产而忽略品种耐旱能力，二是针对不断发展的出口需求，人们更注重品质，容易忽视品种对当地自然条件的适应能力。

② 轮作　谷、糜都忌连作，重茬会导致病、虫、草害加重，土壤营养失调，因而减产。倒茬作物应首选豆类、薯类、小麦、玉米等作物。

③ 整地　春播谷、糜的田块须在先年冬前深耕，以利于养地蓄水，结合深耕施入有机肥效果更好。春季要顶凌早整，尽力做到及时浅犁塌墒，多次耙耱保墒，播前镇压提墒。

④ 播种　谷糜属小粒作物，春播关键是“适期”、“适量”、“适浅”、“抢墒”、“条播”。适期即不能早播，10cm 地温稳定通过 10℃以上始播为好，使播期放在最佳时段；适量即播量恰当，在一般谷子 7.5～10kg/hm^2、糜子 12～18.5kg/hm^2 的基础上，根据当地当年实际情况灵活调整，宁稠勿稀；适浅即播种覆土深度掌握在 3～5cm 之间，墒情好可浅，墒情差稍深，以保出全苗；抢墒即按时提墒，借墒抢播，下种于最佳墒情之上；最好采用耧播或条播机播种，既便于调整播量和深浅，又便于以后的田间管理。谷糜的夏播保全苗难度更大，可贯彻早、少、细、保。早即抢墒早播；少即不犁不整少折腾，直接生茬播种；细即播后细耱细压，能够碎土块、提底墒；保即保全苗，重在防板结压苗，防露芽烧苗（有些地方俗称放泡）。地下害虫严重地区利用包衣或农药拌种防治。

⑤ 田间管理　一要及时定苗，避免定苗过晚而荒苗。一般 5～7 叶时一次定苗，若播量大，墒情好，出苗稠时，可于 3～5 叶期间苗一次。二要严控密度，各地都有一些经验指标，一般的规律是谷稀糜密，春（播）稀夏（播）密。如春谷公顷留苗数，山地 20 万，旱塬 22 万～30 万，川道水地 30 万～35 万；此三类地区的夏谷应在其春谷苗数的基础上各增 3 万～5 万。北方与黄土高原的春播糜子密度可掌握山、旱、薄地 90 万～120 万，水川地 60 万～90 万，夏播糜子旱地 100 万～125 万，水川地 200 万左右。三要提墒蹲苗，出苗后 2～3 叶镇压，水旱地皆可采用。四要坚持中耕，出苗前破板结需要中耕，苗小时除草护苗需要中耕，干旱中耕能提墒促根保水，多雨中耕能晾墒断根控旺，“锄头下有水、锄头下有火”就是这个道理。

⑥ 地膜覆盖技术应用　在地势平坦、肥力较高、年均气温低、无霜期短、积温较少等类型的地区，围绕抗旱、节水、提温，可采用地膜覆盖技术。一般宜采用宽窄行膜侧种植法，可在宽行起垄，谷（糜）播沟内。收获后应及时清除田间残留膜。

7.2.3 甘薯与马铃薯

甘薯（*Ipomoea batatas*），又名番薯、白薯、红薯、红芋、地瓜等，为旋花科甘薯属一年生或多年生蔓生草本作物，主用块根作食粮、饲料和工业原料。

马铃薯（*Solanum tuberosum*），又名土豆、洋芋、山药蛋等，为茄科茄属一年生草本作物，主用块茎作食粮、蔬菜和工业原料。

7.2.3.1 分布、生产与用途

甘薯和马铃薯起源于美洲热带和南美洲亚热带，16 世纪末叶传入中国。我国种植面积 600 余万公顷。甘薯主要分布在中国东部和中部即东半个中国，新疆、西藏、青海和甘肃等省区仅零星栽植，但南北跨度极大，北起辽宁、吉林，南至台湾各岛屿都有栽培。马铃薯遍布全国各地。

甘薯和马铃薯经济器官块根和块茎，其主要成分为淀粉、糖、比较丰富的维生素（C、A、B_1、B_2、B_6）以及可供人体代谢利用的矿物质元素（铁、钙等），作为主要粮食和蔬菜，还广泛用作食品、纺织、造纸、医药等工业原料。

7.2.3.2 形态特征与习性

（1）甘薯

根系发达，有三种根型即须根、块根、纤维根。须根可扎深 100cm 以上，吸取土壤水分和营养；块根在地表下 5～25cm 处膨大形成薯块；纤维根亦称柴根，是干旱、雨涝高湿、板结等不良土壤环境下形成的直径 1cm 以下、长度 30～50cm 的肉质根，没有生物学作用和经济利用价值。薯块有纺锤形、圆桶形、球形等多类，皮色有白、黄、红、紫红等多样，薯肉颜色有白、黄、橘黄、紫晕等多种，这些都是种性的表现，与栽培条件和营养成分无直接关系。薯块周布芽眼（隐形），有"根出芽"特性，可用薯块育苗进行无性繁殖；茎匍匐，蔓生或半直立，蔓长可达 700cm 以上，茎节再生能力强，能形成分枝并生根，可利用该习性剪蔓扦插扩繁；叶片光滑，表皮细胞含角质多，叶肉细胞胶质体多；短日照习性；蔓长、叶多、叶面积大，因而光合能力强，效率高。甘薯喜光不耐郁蔽，喜热不耐低温。与强光照相联系，利于甘薯生长的最适气温为 25～28℃，高温可耐 38℃ 以上，低于 15℃ 便停滞生长，低于 10℃ 茎叶受害萎蔫，遇霜即死。

（2）马铃薯

利用种子有性繁殖时为直根系，利用薯块无性繁殖时为须根系，根深 30～80cm，最长可在 100cm 以上。茎分两部分，地上茎直立、半匍匐或匍匐，高 50～80cm，有分枝，是绿色光合部分；地下有主茎（支持）、匍匐茎和储藏营养的块茎（变态而膨大的匍匐茎）。薯块有圆、长圆、卵圆等多形，皮色有白、黄、粉、红、紫等多样，薯肉有白色、淡黄、黄色等多种。薯块周布芽眼，可看见明显的休眠态复芽，能利用其进行无性繁殖。早期叶片为单叶，随生长渐出羽状复叶，表面被绒毛。马铃薯适于温凉气候。其最适生长温度为 15～20℃，25℃ 以上块茎膨大严重滞缓，30℃ 以上茎叶停止生长，但对低温却能耐受至 0℃ 左右。马铃薯薯块有休眠期。薯块萌芽时，芽眼周围产生龙葵素，人畜食用易导致中毒。马铃薯具有更广泛的适应性，可在全国各地充分利用纬度、海拔、季节等一年四季种植。

7.2.3.3 耐旱栽培与管理

（1）选择土壤

沙质到黏质、pH 值从 4 到 8.5 都可栽培，一些其他作物难以生长的瘠薄土壤

或陡坡山地，栽植两薯都会有一定收成，也是山岭沟坡地区人们的重要救灾口粮。

（2）选择茬口

甘薯的黑斑病、瘟病（长江以南多发）、根腐病等，马铃薯的青枯病、疮痂病、黑胫病等，都能通过土壤向下年（茬）传播，因而会逐年（茬）加重。马铃薯的早疫病和晚疫病是番茄、茄子、辣椒等茄科作物的共染病害，也能通过残茬枯叶相互传播并不断加重，故马铃薯不能同茄科作物连茬种植。

（3）选择季节

露地栽培，甘薯春插适期要求日均气温稳定通过 16℃，因此，北方地区春薯栽植一般都延至春末夏初；黄淮流域的灌溉区，也具有较好的光热条件，在夏作物收获后还能种植一料夏薯，只要水肥充足和措施得当，也能获得高产。马铃薯在日均气温稳定通过 7℃以后即可栽植，但在日均气温超过 25℃以上则影响其生长，所以气温过高的地区和季节，一般都不宜栽种马铃薯。甘薯栽培选择热区热季，即就热避寒，日均气温稳定通过 16℃以上的期限在 120 天（高产田可长达 180 天）以上，都可栽植甘薯；马铃薯选温区温季，即避热避寒，日均温稳定通过 7℃到日均温不超过 25℃的期限在 70 天以上，就可满足最短生育期品种的生长日期，就能够栽植马铃薯。

（4）选择品种

选择两薯品种，应首先区分地区类型，即须重视品种的区域适应性，然后再选用途、品质（切干率、可溶性糖、粗蛋白等）和抗逆性（耐旱、耐涝、耐寒、耐储、抗病等）。甘薯在中国自北向南分为北方春薯区、黄淮春夏薯区、长江流域夏薯区、南方夏秋薯区和南方秋冬薯区共五大区域，比较严格的界限是以秦（岭）淮（河）线为界的南北两大块，它们在耐寒与耐热、耐旱与耐湿以及抗病虫害等特性上都具有明显区别。北方干旱地区一定要选用北方育成品种，如辽薯（东北）、京薯（北京）、冀薯（河北）、徐薯（徐州）、秦薯（陕西）、豫薯（河南）、济薯、烟薯和鲁薯（山东）等型号的品种；南方夏、秋、冬薯区可选用苏薯（江苏）、宁薯（江苏）、浙薯（浙江）、湘薯（湖南）、鄂薯（湖北）、广薯（广东）、桂薯（广西）、台农（台湾引入）、闽、福薯（福建）、南（充）、绵（阳）、川薯（四川）等型号品种；许多甘薯常栽区都有一些特殊适应性的地方农家种，经过纯化选育或脱毒处理，也可继续重视利用。用途不同，选择品种的条件不同。用于鲜食，要求品种切干率和可溶性糖相对含量较高、适口性好、耐储藏；用作工业原料，需主选淀粉含量和切干率高；用于饲料，则薯块和薯蔓的粗蛋白、胡萝卜素等营养成分的相对高含量都应当考虑。马铃薯品种的选用要特别注意与栽薯季节相适应的生育期和耐旱、耐热等特性。北方干旱地区大面积栽植的品种一般用作食粮和提取淀粉，宜选生育期长、产量高、耐旱、耐热的高淀粉品种；用作蔬菜的小面积品种则需选用生育期短，薯块形状规则（畸形薯少）、淀粉含量较低而维生素、食用矿物质元素等营养成分含量较高的品种。不管何种类型，对于两薯品种抵御主要病虫害的抗性要

求都应从高从严。

（5）选用新优栽培技术

根据两薯的特殊生长习性，结合各地传统栽培措施，充分采用一些效果明显、便于操作也能大范围推广的新设施和新技术，使耐旱节水与高产栽培有机结合，就能获得较高的经济回报。

① 推广利用脱毒栽培技术　该技术对于农户栽培而言并不复杂，只要在无毒田块（未栽植过两薯的田块、虽曾栽植但未发生过病害的田块、虽曾发生病害但已经倒茬三年以上的田块）栽植脱毒苗，就会使产量大幅度提升甚至成倍提高，品质也明显优化。这一技术彻底解决了一直困扰着两薯大面积常年栽培区的种苗退化问题，而这种退化的原因主要是多种病害所致。经过对众多试验资料汇总测算，我国甘薯因病害减产率平均为 25.7%，每年损失甘薯约 2000 万吨，折合人民币 40 亿元。而马铃薯病害损失率也有相同的趋势，轻者减产 10%～30%，重者减产达 70%～80%。由于脱毒苗生产技术性强，专业化程度高，用苗量大而集中，并存在着产、供、用苗的系统协作与配合问题，因此，快速生产和大量提供无毒苗就成为推广利用该技术的关键和难点。在两薯栽培面积较大的地区，需要结合科研单位或科技部门，建立脱毒苗工厂化生产基地，配备专门设施和专业人员，进行无毒苗专业化规模生产；更需要建立一个系统工程，形成“政府引导（支持、提倡）→企业开发（科研机构或企业投资建基地）→农技推广（技术指导与支撑）→农民栽植→产品收购与加工”这样环节全面配套紧密的产业链。

② 广泛采用沟垄栽培技术　即根据品种类型、产量指标和栽植密度，按一定标准在地面起垄成沟，于垄上栽植薯苗。一般栽植甘薯时垄距 80～100cm，垄高 35cm，垄面宽 20cm。单行栽植株距 20～30cm，栽植密度约 45000 株/hm^2；高密度时可双行栽植，三角定苗，每公顷可达 50000～70000 株。马铃薯一般密度略大，可采用垄距 70～90cm、垄高 25～30cm、垄面宽 15cm 的模式。单行密度 60000 株/hm^2 左右，双行 80000～90000 株/hm^2。垄沟栽培有三大好处：一是几乎所有块根（茎）和大量须根都处在良好的通气环境之中；二是土壤与空气接触面增大，白天增温和夜间降温迅速，昼夜温差加大，利于薯块积累膨大；三是旱地可利用沟底积聚雨水，既减少地面径流而增加土壤水分，又能减轻块根（茎）部地面板结，水地垄沟则能起到雨多排水、干旱灌水两大作用。生产实践证明，该技术一般可使产量提高 20%以上。春薯区可结合施肥实施冬春沟垄翻倒法，即冬前按计划的规范尺寸，在预备作垄处开沟（深 35cm 但不做修饰），旱地沟内冬纳雨雪，灌区春旱时沟内灌水（大量节水），备耕时沟内施足底肥、沟垄翻倒、以沟作垄并修整备栽。此法增产效果更佳。

③ 地膜覆盖栽培技术　与垄沟栽植技术相结合，栽植前 5～7 天在垄上喷洒除草剂后覆膜，膜宽根据垄距确定，一般不超过 90cm，以膜不盖沟为标准，最好于沟底留 10～15cm 无膜。用锥形棒直接在垄面扎孔注水插苗，覆土的同时压严膜孔

周边，以防进风撕膜。应注意分段（平地 20～30m）修筑横向排（灌）水沟（垄）。覆膜能显著提高地温，提早栽植 2～3 天，提早结薯 7～12 天，薯块膨大快，水肥利用率高，畸形薯少，品质明显改观；旱、水地覆膜后都能增产，且增产幅度多在 50%以上。覆膜技术须同其他高产措施相配套，如选用高产、耐热、生育期长、短蔓或紧凑株型、不易旺长也不易早衰的品种，适当增施底肥，灌区遇旱及时补水，及时拔除沟内杂草，经常查膜压膜并最后清除残膜等等。

④ 早春双膜双（多）季制栽培方法　在一些水肥条件较好、热量充足、生产力高的地区，若具有当地用量大、销售流通渠道通畅、储藏加工便利等条件，还可采用早春双膜双（多）季制栽培方法：在上述地膜方法的基础上，将栽植期再提前 2～3 天，地膜插苗后再建弓棚（宽度 2～3 垄，高 100～120cm），覆“天膜”；30 天左右揭去天膜，揭膜前 4 天左右开口练苗；黄淮流域的 7 月上中旬即可收获一季薯上市，同时剪留蔓尖作为薯苗进行二次扦插；可配合实施沟垄麦草覆盖；霜期（10 月下旬到 11 月上旬）来临前收获二季薯。该技术的意义不仅在于提高产量，更具有增加产品价值的优势，即一季薯上市早或填空市，售价较高。

⑤ 配方施肥技术：重施有机肥，多施钾磷慎施氮。作物栽培中的施肥原理之一有“土壤缺而施之有效，作物喜而施之有效”，中国北方土壤一般不缺钾，但因两薯喜钾，也须施用钾肥。经研究测定，每生产 1000kg 薯块需从土壤中吸收氮（N）、磷（P_2O_5）、钾（K_2O）分别为 3.5kg、1.75kg、5.5kg；经生产实践，45000kg/hm^2 以上高产田块，每生产 1000kg 薯块需施用的三要素纯量和比例为 5kg∶5kg∶10kg。可参考上述标准，根据土壤养分测定结果和有机肥已施入量来确定三种化肥的应该补充量。生产实践显示，在没有两薯专用复合肥而用三类单肥搭配作底肥时，氮肥用碳酸氢铵较尿素为佳（能同时释放较多的 CO_2）；两薯忌氯，绝对不用含氯化肥；利用磷酸二氢钾在两薯栽植时结合灌窝水施用（占全生育期总用钾量的 25%）和后期叶面喷施（占全生育期总用钾纯量的 5%）具有良好效果。

两薯既是耐旱耐瘠作物，也是生产潜力大的高产作物，但在不同条件下产量水平差异较大。各地无需追求统一模式或高指标，而应根据当地生态环境和生产力水平，不断研究总结并确定配套技术方案，争取使产量和经济效益双提高。

7.2.4 高粱

高粱（*Sorghum vulgare*），又名蜀黍、芦粟、秫秫等，禾本科高粱属一年生草本作物。

7.2.4.1 分布、生产与用途

高粱是世界五大谷类作物之一，种植分布极为广泛，其大量的野生种主要分布在非洲。每年全世界种植面积约 4400 万～5000 万公顷，总产量约 6900 万～7700 万吨。种植面积最大的国家是印度，每年超过 1000 万公顷，其后依次是苏丹、尼

日利亚、美国、中国、墨西哥等。

高粱是中国最古老的粮食作物之一，20 世纪 60 年代之前的低生产力时代，中国年面积超过 700 万公顷，总产 780 余万吨，主要分布在长江以北的大半个中国，面积自南向北渐次增多。60 年代之后，面积逐年下降，至 20 世纪末已不足 100 万公顷。中国高粱的区域性表现与其他作物相类似，最北部沿国境线向内宽约 500km，自东北三省向西竖跨全国到新疆的圆弧形狭长区域为春播早熟高粱区；向南以黄河、秦岭为界的东西向狭长区域为春播晚熟区；再向南以长江为界，东起山东西到四川的狭长区域为春夏兼播高粱区；长江以南的南方高粱区仅零星种植或再生栽培。全国高粱种植面积较大的省区有辽宁、内蒙、黑龙江、山西、河北、山东等，其中辽宁种植最多，单产也最高，目前主要栽培省区平均单产多在 4500kg/hm^2 以上。

高粱原为粮饲兼用作物，20 世纪 70 年代之前，曾是我国一些地方的主要食粮之一，后随生活水平提高而逐渐成为调剂食品。现在的籽粒用途是酿造工业（酒、酒精）和淀粉、制糖（甜高粱）工业等，秸秆可用作饲料或编织材料。

7.2.4.2　主要特征特性

高粱有庞大的须根系，入土深度通常为 100～150cm，最深达 200cm 以上。高粱支持根（气生根）很发达，一生中可根据需要从茎秆基部 1～3 节上不断分生支持根，入土后支持茎秆抗倒伏，并可再生侧根以协助吸收水分和营养；高粱茎秆高大、直立、坚韧，粗度偏小但为实心多汁，含可溶性糖和多种盐分，既有较强的抗折能力，又有较好的缚水保水效果；株高从 50～100cm 的特矮秆到 350～500cm 的特高秆，类型多样，目前生产利用品种多为 250cm 以下的中矮秆；叶片略窄偏长，由一条中脉和多条平行脉形成发达的疏导组织，叶片两面均有气孔，并有多排活动细胞，对缺水反应敏感，调节功能灵活，在干旱胁迫时叶片纵向内卷，呈休眠状态而保持体内水分；叶、茎表面角质化程度高，分泌有较厚的蜡粉层，能有效阻减水分蒸发；高粱为圆锥形花序，从紧密到松散有系列穗型，一般粒用高产品种多为紧穗，红壳、中大粒型，千粒重 26～40g，以 30g 左右居多；籽粒含淀粉约 70%～80%，其中直、支链比例约为 3∶1，蛋白质含量约 10%，脂肪含量 3%～4%，缺乏赖氨酸等动物必需氨基酸，含有不利消化和口感（发涩）的单宁（多酚化合物），一般含量约 0.1%～1.5%，后两项影响品质进而限制食饲价值。

高粱是喜温 C_4 作物，较大的叶面积和高效率的 C_4 循环，使之光合效能较高，生长快速旺盛，产量潜力较大。同时，高粱抗逆性强：生长适温 20～34℃，因而耐高温；蒸腾系数 230～440，低于玉米、小麦等作物，具有多而全的保水结构与功能，因而耐旱；生长后期通气组织完整顺畅，在较长时间的涝渍危害下不会迅速致死，因而耐涝；发达的根系保证了水分和养分的吸收能力，因而耐瘠；对土壤 pH 值要求不严格，能够适应 pH 值 5～8.5 的土壤环境，在土壤含盐量 0.3%以下不影响发芽出苗，孕穗后在 0.5%的含盐土壤中仍能正常生长，因而耐盐碱；腋芽

可发育成分蘖或分枝，苗期受雹、风等灾害后加强管理，能够再生并正常结实，因而具有一定抗灾能力。充分利用这些特性，可以在正常有利条件下争取高产、不利和胁迫条件下争取一定的收获。

7.2.4.3　**抗旱栽培技术措施**

高粱品种类型较多，根据用途可选粮用、饲料用、糖、酒、淀粉等工业用的不同类型；目前生产主用杂交种，也有一些特殊地区适用常规种；一般常规种抗逆性强而高产性差，杂交种丰产潜力可高达 9000～10000kg/hm²，但也有产量偏低而抗逆性较强的杂交种类型，旱区应重视选用适应旱瘠条件的常规种和耐旱性好的中产杂交种。高粱不宜连作，重茬易感传病害，土壤养分易失调而使生产力下降，其轮作（前茬）作物有玉米、大豆、谷子、小麦、棉花等，其中以大豆等豆科作物或豆科牧草、绿肥等轮作效果为佳。高粱虽为耐旱耐瘠作物，但对水肥反应比较敏感，在增加土壤肥力中，增施氮肥的增产效果最为显著，磷肥次之，钾肥不够稳定，旱地应注重氮磷钾配合施用。中国长城以北多为垄作，其南常为平作；春播区冬前施入有机肥后深翻，早春土壤解冻后及时耙耱平整或起垄，旱地平作应于播前镇压提墒；高粱的播种很关键：春播期要求 5cm 地温 12℃以上，一般在 4 月上旬至 5 月上旬，随纬度和海拔的升高而后延；夏播地区多采用硬茬抢墒播种或播后溜水（干旱缺水）救苗，重在争时；播种深度掌握在 3～5cm 之内，旱地或墒情不足的水地适当播深；种植密度 6 万～12 万株/hm²，旱薄地、高秆、大叶披叶品种需要低密度，中、矮秆、上挺叶品种以及水肥条件好者可用高密栽培，下种时结合当地气候特点和当年水分状况适增播量。高粱田间管理中，要重视多中耕、勤除草、3～4 叶间苗、5～6 叶定苗、蹲苗、除蘖、孕穗期补水追肥等一系列传统措施，也可利用地膜或秸秆覆盖技术；旱区高粱易受蚜虫和红蜘蛛危害，应及时防治；高粱忌氯，使用肥料和农药时绝不可选择含氯产品。

7.2.5　荞麦

目前生产上利用的荞麦有甜荞、苦荞、翅荞、米荞、野荞等多种类型，属蓼科（Polygonaceae）荞麦属（*Fagopyrum*）不同种，一年生或多年生草本作物，也常被称为非禾本科谷物。

7.2.5.1　**荞麦类型及其基本特点**

甜荞（*F. esculentnm*），又称乌麦、花麦、三角麦、荞子等，是中国利用面积最大、范围最广的栽培种，亦称普通荞麦。茎细长有棱，色淡红带绿，叶基无花青素或有少量不明显花斑；总状花序，上部果枝伞状花序，花较大，玫瑰红色，有长花柱短雄蕊和短花柱长雄蕊两种类型，通常一株同型，须异型授粉才可受精结实；子房周布蜜腺，具香味；瘦果较大，三棱形，表面与缘边光滑，品质好。

苦荞（*F. tataricum*），又称鞑靼荞麦，主栽于中国西南地区。茎光滑，叶基有明显花青素斑点；均为疏散总状花序，花较小，紫红或淡黄绿色，雌雄蕊等长，自

花授粉，无香味；瘦果较小，棱不明显而呈波浪状，表面粗糙，棱间有凹线，壳厚，果实略苦。

翅荞（*F. emarginatum*），多种植于中国北方和西南地区，茎淡红，叶大；多为自花授粉；瘦果有棱而呈翼状，品质较差。

米荞，全国各荞麦区均有少量种植。其瘦果形、味均似甜荞，但棱钝皮皱又似苦荞，种皮易爆裂而成荞米（仁），故称米荞。

野荞（*F. cymosum*），又称金荞麦、老虎荞、万年荞、土茯苓等。主要分布在中国西南和东北，多为野生状态，也有甜、苦两类。野甜荞高大花多但结实率低，野苦荞株高仅 40cm 左右，花期可长达 100 天，结实率高。野荞一般不直接用于生产种植，可作为育种原始材料，也有采集野生果实加工食用的。

7.2.5.2 生产分布与用途

荞麦分布在温带和冷凉气候区，中国、俄罗斯、乌克兰、波兰、法国、加拿大和美国等地均有种植。目前全球总面积约 750 万公顷，总产量约 550 万吨。

我国是荞麦生产大国，常年种植面积约 100 万公顷，主栽甜荞和苦荞，分布在四大区域：以淮河秦岭沿线（秦淮线）为界，北方有两大甜荞种植区，其中燕山长城沿线以北的北方春荞区，分布有全国 80%以上的甜荞面积；该区向南至秦淮线以北的黄河流域为北方夏荞区，种植着其余 20%的甜荞面积；秦淮线以南的南方秋、冬荞麦区和西南高原春、秋荞麦区皆以种植苦荞为主，约占全国荞麦总面积的 1/3。

中国年产荞麦约 70 万吨。甜荞单产平均不足 $700kg/hm^2$，部分高产田可达 $2500kg/hm^2$ 左右；苦荞产量较高，单产一般为 $900 \sim 2250kg/hm^2$，高产田可超 $4000kg/hm^2$。

荞麦虽为粗粮，但营养成分较全：籽粒含蛋白质 11%～16%，脂肪 2%～3%，淀粉 63%～71%，纤维素 10%～16%；荞麦米、粉中的蛋白质、赖氨酸等含量高于小麦粉、大米、小米等，清蛋白和球蛋白比例大；含有较丰富的维生素 B_1、B_2、E、PP 以及含量较大的多种人体所需矿物质元素；苦荞籽粒外层的高含量芦丁、烟酸和食用维生素，都具有降低人体血脂、血糖和胆固醇作用。荞麦不仅是一些冷凉地区的重要食粮和许多秋作区的搭配食粮之一，更是被人类所认识和利用的营养、保健和食疗食品的重要原料。中国每年出口荞麦约 10 万吨，主销于日、韩等东南亚国家和地区。

7.2.5.3 重要形态特征和生长习性

荞麦为直根系（少量野荞有块根或地下肉茎），主根可深扎入土 50～100cm，并在生长过程中根据吸收水分和养分的需要，主根周围不断持续地分生侧根，最高多达 100 条以上，但发芽出苗时根小苗弱，顶土能力差。茎直立，高度为 60～150cm，主茎腋芽不断分生出一级分枝，一级分枝还可再生二级，条件好时可有多级分枝；成株后形成空心茎，壁薄、韧而不坚、易折怕风；一般苦荞多有较强的顶

端优势，主茎发达，而甜荞主茎优势不很明显，往往有多个侧枝与主茎争雄。叶柄能调整叶片部位以减少郁蔽和追求光合，叶片戟型互生，在全生育期内由小→大→小变化，同化能力较差，光合效率不高。花序有总状（无限）、聚伞状（有限）和混生等多种，花有长柱短雄蕊和短柱长雄蕊两型，同株同型，两型比例约 1∶1，花内基部雌雄蕊间着生蜜腺，利于虫媒异花授粉。籽粒多为三棱性，有黑、黄色硬壳；一般中国南方的籽粒偏小，向北随纬度上升而逐渐增大；苦荞千粒重 10～30g，主要是 15～20g 的中粒品种（60%）和 20～25g 的大粒品种（27%）；甜荞千粒重 20～40g，以 25～30g 的中粒品种应用最广。荞麦为短日照作物，喜凉爽湿润，不耐高温，惧怕霜冻；全生育期有效积温仅 1000～1200℃，苗期适温 15℃以上，花实期适温 20～25℃左右；生育期仅 2～3 个月，出苗后南方 8～10 天、北方 20 天左右即现蕾，随后营养生长与生殖生长并行，花期持续长达 40 天左右，但结实性较差，无昆虫（蜜蜂等）传粉、遇阳光曝晒（晒花）、多雨（灌花）、大风等因素，都会导致不实，一般单株结实率约为 15%左右。荞麦耐旱性差，蒸腾系数在 450～630 之间，需水量常超过小麦。

荞麦虽属低产作物，但因生育期短而成为许多自然灾害多发地区的填闲救灾作物，一些省区往往储存荞麦种子以备受灾急用。

7.2.5.4　荞麦抗旱高产栽培技术

① 选用适应性良种　目前生产利用较多的还是地方品种，虽然产量水平偏低，但具有特殊适应性和稳定性。近多年也从国外引进的北海道、牡丹等甜荞品种，已在陕西、甘肃、宁夏等春荞麦区推广，也有一些科研单位选育出高产稳产的优良品种。甜荞品种有吉林农大育成而适应东北地区的“吉荞 10 号”（生育期 80 天、株高 80cm、千粒重 28g）、内蒙古农科院选育的早熟品种“茶色黎麻道”（生育期 75 天、株高 80cm、千粒重 30g）、甘肃平凉地区农科所选育的“平荞 1 号”（生育期 85 天、株高 80cm、千粒重 30g）、陕西榆林农校选育的大粒高产品种“榆荞 2 号”（生育期 85 天、株高 85cm、千粒重 32g）、山西省农科院育成的“晋荞 1 号”（生育期 80 天、株高 80cm、千粒重 29g）等；苦荞品种有西北农林科技大学选育的“西农 9940”　（生育期 92～94 天，株高 106.8～112.0cm，千粒重 106.8～112.0cm）、江西吉安农科所选育的“九江苦荞”（生育期 80 天、株高 108cm、千粒重 20g）、四川西昌农专选育的“西荞 1 号”（生育期 75～80 天、株高 90cm、千粒重 20g）、四川凉山农科所选育的“川荞 1 号”（生育期 80 天、株高 90cm、千粒重 20g）、湖南省凤凰县农业局从湖南省凤凰县当地苦荞混杂群体中选育的“凤凰苦荞”（生育期 85～90 天、株高 100cm、千粒重 22g）、陕西榆林农科所选育的“榆 6-21”（生育期 80 天、株高 90cm、千粒重 22g）等。在引用新品种时，应掌握就近引用、同海拔或同纬度间引用原则、高海拔与高纬度、低海拔与低纬度的互引原则、春播选晚熟品种、夏播用早熟品种等，都须先试验后推广。

② 深耕细整，疏松土壤　春播区可于冬前结合施入有机基肥深耕晒垡，纳雨

存墒，开春后顶凌耙耱碎土，旱地和砂壤土可多次镇压提墒，力求土壤疏松细绵；夏播时应重视前茬选择，早熟作物如豌豆、油菜等茬口较好，须在前料作物收获后尽快浅耕、耙耱、镇压，亦求细平松软，确保一播全苗。

③ 培肥地力，科学施肥　荞麦为喜肥作物，每生产100kg籽粒，需N、P_2O_5、K_2O分别为3.5kg、1.5kg、4.3kg。荞麦更喜有机肥，适于重施基肥，巧用种肥，非高产田块或特殊情况而不用追肥。春播田块冬前施入有机肥45000～75000kg/hm^2后深翻，开春浅耕时根据产量指标，每公顷可增施尿素200～300kg，过磷酸钙300～600kg，钾肥（可选用硫酸钾等）300～600kg，高产田块趋上限，低产田块趋下限，北方施钾可少，南方施钾宜多。一些夏播地区常采用将有机肥碎细过筛，粪块直径不超过1cm，与种子、磷、钾肥等拌匀；播种时畜犁开沟，将拌肥籽种溜入犁沟，后犁开沟时翻土覆盖。若利用机械耕种，可将有机肥与化肥拌匀同施，浅耕（或旋耕）后耙耱，旱地镇压，然后播种。

④ 精细播种，保证全苗　首先是种子处理。在播前晒种2～3天，利用风选、水选、筛选、机选等方式除掉空、秕、破粒及杂质。播种时可用35℃温水15min温汤浸种，也可用0.1%～0.5%硼酸溶液或5%～10%草木灰浸出液浸种30min（不断翻动），都具有出苗快、全、壮的良好效果。在地下害虫危害严重地区，还应利用包衣种子或农药拌种，可选用50%辛硫磷或40%甲基异硫磷等按种量0.1%～0.2%用药、2%～3%加水、拌匀堆闷3～4h。荞麦种植原则是“春荞播在霜后，秋荞收在霜前”。春播期抓住冷尾暖头，以日均气温稳定通过15℃或当地常年终霜期为参考；夏播显然越早越快越好。合理密植，北方春荞密度60万～100万株/hm^2，夏荞75万～110万株/hm^2，南方秋、冬荞90万～120万株/hm^2，一般是苦荞比甜荞密、夏播比春播密、短生育期比长生育期密、旱地比水地密、薄地比肥地密。大多甜荞品种1kg种子出苗2万左右，苦荞大约3万，可用上述指标核定播种量；无精播设施或土壤条件较差，应增加种量10%～20%作保证（保险）系数以保匀争全。荞麦播种宜浅不宜深，一般3～4cm，最深不超过6cm；土壤水分充足宜浅，干旱稍深；夏播宜浅，春播稍深；黏土质宜浅，砂土质稍深；小粒弱苗品种宜浅，大粒壮苗品种稍深。

⑤ 加强田间管理　要坚持补苗保苗、疏苗间苗、中耕除草等基本措施，重在及时、勤作。要增加辅助授粉，最好利用蜜蜂传粉，据试验可增产80%～200%。在没有放蜂条件时，可进行人工辅助受粉，于盛花期间隔2～3天上午9～11时，两人扯开20～50cm宽的布条，从荞麦顶部轻轻拉过，增产效果亦很明显。可利用秸秆覆盖技术，将禾谷类作物秸秆适当碎短到3～5cm（细秆作物可长），待播种后均匀覆盖地面，行上薄覆行间厚盖，具有抗旱保墒和翻入土壤后肥地松土等良效；秸秆覆盖后对地下害虫和病菌繁衍有利，在病虫害易发和重发地区，花期需要保护昆虫（蜜蜂等），对荞麦病虫害要早防为主，重在苗期，除利用深翻灭蛹、药剂拌种和土壤消毒灭虫等措施外，可在苗期连同秸秆全面混合喷洒抗（防）病剂如1：

1∶200 的波尔多液、65%可湿性代森锌 500 倍液、粉锈宁 1000～1500kg/hm^2 等和抗（防）虫剂如 40%乐果 2000～3000 倍液（杀灭黏虫等）、2.5%溴氰菊酯3000～4000 倍液（杀灭草地螟虫等）、90%敌百虫 800～1500 倍液（杀灭钩刺蛾等）等，花期采用人工捕杀、灯光诱杀等方法也有较好效果。

7.2.6　大豆与杂豆

7.2.6.1　生产意义与应用价值

豆类作物都属于豆科（*leguminoae*），一年或越年生草本植物；直根系，有比较发达的主根与侧根，可被根瘤菌侵入共生而产生根瘤；有直立、丛生、蔓生（匍匐）和缠绕等多种茎型；主茎和分枝的叶腋、顶端着生总状花序，自花受粉；结荚产豆。

利用根瘤菌固氮是豆科作物的独特优点之一，固氮能力强的作物如大豆、绿豆、菜豆、豌豆等，每年可吸收固定的氮素约 45～90kg/hm^2。豆科作物也是不可替代的肥地养地和轮作倒茬作物。据统计资料，中国年用氮素化肥约 2500 万吨，为世界之首；单位面积施用量是世界平均用量的 35 倍，为世界之最；氮素利用率低于发达国家 10～15 个百分点，仅此可使中国年经济损失达 380 亿元。在保护环境、保护人类健康的世界主旋律下，有机农业和有机食品已被广泛认识，生物固氮将具有更为积极的意义。由于豆科作物肥地养地，生育期短，多耐荫蔽，对生产条件要求不很严格，与其他农作物和园艺作物的共生性病虫害少，因此是轮作倒茬作物的最佳选择。

豆类作物是一些特殊生态地区维持基本生产或填空补闲而不可缺少的作物。绿豆生育期短，耐旱耐瘠，扁豆耐寒耐旱，豇豆耐热，它们是一些干旱寒冷或干旱高热、无霜期短等特殊气候区域的主栽或搭配作物；蚕豆耐雨耐湿耐沾土，是南方一些多雨常湿润区的重要稳产作物；鹰嘴豆耐冷凉、干旱，在年降水低于 300mm 的地区仍有收成，可作为新疆、甘肃、青海等一些高海拔低热干旱地区的主栽作物之一。

豆类作物能够提供优于禾谷类作物的植物蛋白、植物脂肪、氨基酸、维生素以及易被人畜吸收利用的矿物质元素。大豆籽粒中 38%～48%的蛋白质和 15%～25%的脂肪，是多种高蛋白食品和优质食用油的原料，其余 40%～50%的碳水化合物以乳糖、蔗糖和食用纤维素为主，淀粉含量极小，被作为糖尿病患者的理想食品。大豆芽、绿豆芽及鲜食菜豆，都能提供大量的维生素 C、B_2、B_{12}、胡萝卜素等重要营养，且适口性好，成为广受青睐的佳味蔬菜。目前生产利用的其他豆类作物，籽粒所含蛋白质都在 16%～30%之间，脂肪含量多在 2%以下，纤维素含量高达 5%～10%，同时具有含量不等但都偏高的 8 种人体（动物）必需氨基酸、维生素 A、C、E、B_2、B_{12}以及钙、磷、铁、硒等元素，因而它们不仅是高蛋白、高纤维素、中淀粉和低脂肪的营养食粮，也都具有保健防病和入药治病之功效：绿豆、

小豆、饭豆均能去热败火、消肿解毒、利水降湿；豇豆、菜豆、蚕豆、黑豆均能健脾壮肾、补阴利湿；黑豆还可养血平肝，除热止汗；蚕豆还能凉血止血、降血压、除水肿；豌豆利小便、解疮毒；扁豆健胃和中、化清降浊；鹰嘴豆补中益气、消渴润肺；……。豆科牧草、豆类作物秸秆、豆粒加工后的副产品如豆饼、豆渣等，都已成为发展畜牧养殖不可缺少的高蛋白、多营养优质饲料。

豆类作物籽粒作为粮食、饲料或经济（加工）用途而参与世界贸易，已成为重要发展方向之一。中国是豆类籽粒出口国，年出口豆类籽粒 100 万～180 万吨，除大豆外，较大宗的杂豆出口依次有菜豆 23 万～58 万吨、绿豆 8 万～29 万吨、蚕豆 2 万～16 万吨、小豆 4 万～7 万吨、扁豆 1 万～3 万吨、豌豆、饭豆、鹰嘴豆等合约 2 万吨。豆类已步入我国出口创汇的重要农产品行列。

7.2.6.2 豆类作物在中国的种植分布与潜力

中国土地面积大，生态区域复杂多样，豆类作物的利用具有悠久历史，几乎所有豆类作物既在全国各地有广泛分布，又各有比较适应的区域集中栽培。根据中国地理气候特点，豆类作物具有基本类似的 3～4 大区划：长城沿线以北包括东北和新疆部分农区为北方春豆区，一般春种秋收，一年一熟；长城以南至秦岭淮河线以北为黄淮海流域（北方）夏豆区，一年两熟，豆类作物为夏种秋收；秦淮线以南的长江流域为南方夏秋豆区，再向南至南海一带为南方秋冬豆区。这两个南方区一年两熟至三熟，豆类作物多作为最后一熟或填空补闲，也常与水稻、小麦、油菜、玉米、甘蔗等主产作物轮作、间作、混作、套种。1949～1979 年的 30 年间，豆类作物每年总面积超过 2000 万公顷。1980 年以后人们普遍追求主粮高产或大量种植瓜、果、菜等经济作物，使豆类面积不断下滑。20 世纪的最后几年，随豆类外贸的发展和有机农业的兴起，其面积又有所回升。目前全国种植豆类作物近 1000 万公顷，大豆（包括黑豆）约占一半。在年均种植面积大约 449 万公顷的杂豆中，113 万公顷蚕豆和 60 万公顷菜豆的 2/3 以上面积分布于南方夏秋豆区，菜豆可向北零散种植至黑龙江，蚕豆在北方春豆区的晋、陕、甘、青北部和内蒙古南部有一定面积；北方夏豆区和北方春豆区主栽有 77 万～170 万公顷绿豆、30 万～40 万公顷小豆、5 万公顷豇豆和 5 万公顷饭豆的 80%～90%，仅约 10%～20%的面积在南方夏秋豆区少量散种；100 万公顷豌豆和 5 万公顷扁豆，均以南方夏秋豆区和北方夏豆区的秋播夏收为主栽方式，北方春豆区的春播秋收仅占总面积的 15%以内；鹰嘴豆约 1 万余公顷，分布在以新疆为主的西北冷凉干旱地区和云贵高原部分高海拔冷凉山区。

依作物与品种类型、种植区域、栽培方式、生产水平各不相同，豆类作物产量差异极大。大豆产量水平最高（其中的黑豆产量偏低），平均达到 3500kg/公顷左右，最高产量达 5000kg/公顷以上；其次为蚕豆，全国平均单产 2260kg/公顷，最高产量可达 4600kg/公顷左右；小豆、菜豆、豇豆等公顷产量维持在 1300～1500kg，高产地区可达 3000kg 以上；绿豆、豌豆、鹰嘴豆等表现低产，平均公顷

产量均在 1000kg 以下，扁豆产量最低，平均公顷单产不足 500kg，但高产区（云南丽江）单产可达 1500～2000kg。豆类作物大多低产的原因，一是作物种性潜力所限，如扁豆、豌豆等就属于低产作物；二是多在低产地区和气候条件较差的区域种植，如土壤贫瘠、气候干旱、高热或冷凉等；三是往往不被人们重视，多作为搭配作物用于间作套种、轮作倒茬或填空补闲，品种改良不够，栽培管理粗放。实际上，只要思想重视，选用优良品种，培肥地力，精耕细作，精细管理，也可获得高产高效。

7.2.6.3　主要豆类作物特征特性

大豆（*Glycine max*），包括黄（白）豆、黑豆、花皮豆多种。中国是大豆起源中心，目前集存种质资源约 1.7 万余份，类型极其丰富。经过长期的人工定向选择利用，黄（白）豆大多已从原来的蔓生习性和小粒型不断被改造为目前生产应用的直立株型和大粒类型；黑豆的改良较少，大多仍保存着蔓生和小粒特点。大豆有两种结荚习性即无限结荚和有限结荚。无限结荚的品种一般植株高大，生育期长，多在中国北方春作区应用，也较适应肥水较差的条件；有限结荚植株茎秆矮、粗壮、节间短，结荚集中，抗倒伏能力强，生育期较短，多用于夏播；该类型的长生育期品种也用于肥水条件较好地区的高产栽培。大豆属短日照作物，但品种类型间反应差异较大，敏感的品种在长日照下会显著延迟花期导致晚熟。大豆喜温，10℃以上积温 2200℃才能满足早熟品种的需要，晚熟品种需积温更高；一般生育期间适温为 26℃，昼夜有 5～10℃温差对生长有利。大豆根深可达 150cm 以上，具有较好的耐旱性，同时对水分反应敏感，在较充足的水肥条件下，黄豆产量提高幅度较大，黑豆却会因徒长、郁蔽、倒伏而大幅度减产，故其更适应旱瘠条件；生产水平不同，大豆单产差异较大，低产地区或遇灾年份往往不足 1500kg/公顷，高产田块却能高达 6000kg/公顷以上。大豆品种类型较多，适应东北和北方春作、黄淮海流域夏作和南方多作的都有，纬度差距较大地区间引种需特别注意日照反应特点。

绿豆（*Phaseolus radiatus*），类型较多，中国集存品种资源 5200 余份。有直立和蔓生（匍匐）两种株型；生育期短，少者 60 天左右，多者可到 100 天以上；多为无限结荚习性，单株结荚数从 10 个以下到 150 个以上，差异极大。短日照，但多数品种对光照反应不敏感。绿豆喜温、耐旱、耐瘠、耐郁蔽、怕涝，品种有北方旱生型和南方中生型的区别，前者主根发达，入土可达 100cm 以上，更长于耐旱，后者侧根多而主根弱，入土浅，比较耐湿。适应北方春播的新品种有“大鹰哥绿 522”、“赤绿 1 号”等，适应黄淮海流域夏播的品种较多，有“中绿”号、“豫绿”号、“淮绿”号、“冀绿”号和“秦豆”号，四川的“南绿”号等可适种于南方秋豆区。

小豆（*Phaseolus angularis*），又名红小豆、赤小豆、竹豆、金豆等。起源于中国，现有品种资源 3958 份。品种有直立、半蔓生和蔓生多种株型，株高差异极大，从 30cm 到 150cm；生育期 90～120 天。短日照，中熟和晚熟品种对光照反应

敏感；栽培品种同时存在有限结荚和无限结荚两种类型，可以高产、比较稳产，多表现耐阴、不串蔓、不倒伏。北方春豆区主要利用东北选育品种如“辽红1号”、“白红1号”（吉林）和东北农家种“宝清江”、“大红袍”等。北方夏豆区或春夏豆交接地区可利用“冀红2号、3号、4号”等新品种。

豇豆（*Vigna*），又名豆角，生产利用有3个种：矮豇豆（*V. cylindrical*），为矮生（30cm左右）直立硬荚型，荚短（7～13cm），粒小（百粒重5～10g），以粒作粮食用；普通豇豆（*V. sinensis*），属半蔓生（蔓长100cm左右）或蔓生株型（100～200cm），豆荚长度10～30cm，百粒重10～20g，菜（嫩荚）粮（成熟籽粒）两用，以粮用为主；长豇豆（*V. sesguidolis*），蔓生或缠绕株型，荚果长30～90cm，肉质肥嫩少纤维，多用作蔬菜。豇豆喜温而不耐霜冻，适温为20～25℃，35℃高温下仍能开花结实。粮粒用豇豆多为短日照和无限结荚习性，夏播生育期一般为60～80天，春播100～120天，其中以半蔓生和蔓生的普通豇豆耐旱性强，适应性广。目前生产用种仍以各地常用的稳产农家种为主，也逐渐育成一些高产新品种，可相互交流引用。适于北方春豆区春播条件的优良地方品种，有生育期100天的陕北“红豇豆”、110天的河北“白爬豆”、115天的山西“麻豇豆”、120天的内蒙古“白豇豆”等；适于中国中部黄淮海及长江中下游地区夏播的新品种有早熟矮秆品种“中豇1号”、早熟中秆半直立品种“I1193豇豆”、中熟中秆半直立品种“豫豇1号”、早熟蔓生品种“I1011豇豆”和“I0502豇豆”等。

菜豆（*Phaseolus vulgaris*），又名芸豆、四季豆、唐豆等，以豆粒作粮和嫩荚作菜两用。有矮生直立（20～50cm）、半蔓生（100cm左右）、蔓生（100～200cm）和缠绕（200～400cm）等四种株型。生育期多与茎蔓长度及结荚习性相关联，矮短株型早熟而有限结荚，长蔓则晚熟而无限结荚；菜豆喜温喜光不耐霜，适宜生长温度20～25℃，10℃以下和30℃以上均影响花实，弱光多荫条件下容易落花落荚；虽属短日照作物，但品种大都对日照反应迟钝，只要热量和生育期满足，全国各地均能春播、夏播和秋播；连作重茬可造成大幅度减产，要建立2～3年轮作制度。菜豆属高产豆类作物之一，目前生产上粒用品种多重视直立、矮秆、中熟、高产型，一般株高在60cm以下，生育期85～100天。东北适应品种有“品芸1、2号”、“龙芸豆3号”，西北适应品种“阿芸1号”（新疆选育），适于北方春夏播和南方夏秋播的有“北京小黑芸豆”、“英国红”、“白腰子豆”等等。这些品种在主要农艺性状和产量、品质等方面差异不显著，利用时应注意抗病性和气候适应性（有耐旱型、耐雨耐湿型、耐热型、冷凉型等）。

蚕豆（*Vicia faba*），又名胡豆、佛豆、罗汉豆等，属于我国大面积高产、以籽粒粮用的豆类作物之一。茎直立坚硬不倒伏，株高30～80cm，为长日照作物，喜温暖湿润气候，不耐高热，适宜生长温度14～20℃，苗期可耐－4℃低温。蚕豆主产于南方秋豆区，占全国蚕豆总面积的90%以上，秋季播种、越冬、翌年夏收，生育期长达150～240天；其余10%的面积种植于北方春豆区，春播秋收，生育期

100～180天。蚕豆不宜重茬连作，也不能与豆科作物轮作，常与小麦、大麦等间作或轮作，也与棉花等秋作物套种。由于南北方不同的种植制度，选用品种必须注意区分两种生态类型。秋播品种有适于出口的大粒型优质良种“慈溪大白蚕”、浙江耐湿品种“上虞田鸡青”、“利丰蚕豆”、江苏大粒品种“南通大蚕豆”、云南大粒品种“云豆324”、四川粮饲兼用的抗病（赤斑）品种“成胡10号”等；北方春播品种有“青海9号”、“青海10号”、“临蚕2号”、“临蚕5号”（甘肃）等，均为大粒、中高秆、短生育期（中熟）类型。

豌豆（*Pisum sativum*），又名寒豆、麦豆等，主以籽粒供粮饲兼用。草质软茎，细长质脆易折；株高有矮生型（15～90cm）、中间型（90～150cm）和高大型（150～300cm），矮生型多早熟直立，高大型多晚熟匍匐；属长日照作物，早熟品种对光照长短不敏感，适应性强；全生育期积温1700～2800℃，幼苗越冬可耐低温－10℃左右，花荚期适温16～20℃，不耐高温，气温26℃以上时影响传粉受精；豌豆是对连作反应最敏感最严重的作物，轮作周期长，需3～5年。秋播区常作为水稻、玉米、甘薯等作物的前后作，或与大麦、小麦等间作、混作；春播区常作为谷子、玉米、甘蔗、马铃薯的前作，或与棉花、玉米、高粱等间作。豌豆以秋播为主，一般10～11月播种，翌年4～5月收获。黄淮海流域为主产区，南方云、贵、川等地亦为适栽区；北方春豆区可春播秋收。目前生产利用的秋播品种生育期多在190天左右，有四川的“成豌7号”、“食荚大菜豌2号”等；春播品种生育期多在90～110天，有“草原224”（青海）、“蒙TY-2”（内蒙引进）、“定豌2号”（甘肃）、“大麻豌豆”（河北）等；中国农科院选育的特早熟品种“中豌4号”既可用于春播（65～70天），又能用于秋播（140～150天），其他中豌号（系列）品种亦各有特点，可引试利用。

扁豆（*Lens culinaris*），又名滨豆、洋扁豆等。属于生育期短、耐旱、耐瘠、抗逆性强、适应性广的低产豆类作物。矮生，株高仅30～50cm，分直立、丛生和半蔓生三种株型；长日照作物，苗期越冬耐寒，可耐受－10℃低温，花期适温18～24℃。扁豆主产区在秦岭以北的西北地区，长城线以南为秋扁豆区，秋种夏收，其中包括云南丽江也有较大面积；长城线以北为春扁豆区，春种秋收。目前扁豆育种工作很少，生产利用品种基本为传统地方种，适于秋播的品种有山西的“襄汾小扁豆”、陕西的“彬县扁豆”、甘肃的“庆阳扁豆”、云南的“丽江扁豆”等；用于春播的品种有宁夏的“同心扁豆”、陕西的“定边扁豆”等；陕西育成的“秦豆9号”是既适应春播（150天）又适应秋播（230天）的高产优质良种，可重视引用。

鹰嘴豆（*Cicer arietinum*）又名桃豆、鸡豆、鸡头豆等。鹰嘴豆在全世界40多个国家分布种植，每年面积近1000万公顷，主产区在南亚、西亚、东南亚等国。我国西北部分地区种植历史较长，但发展不大，近多年来由于药用价值和出口，逐渐引起重视。鹰嘴豆株高30～70cm，有直立、半直立和披散等多种类型；为长日照作物，品种多对光周期反应不很敏感，部分晚熟品种在长日照下可提前开花；该

豆有效积温约 1900～2800℃，花实期适温 16～24℃；鹰嘴豆具有十分广泛的适应性，从干旱沙漠到湿润雨林都有分布，但最适宜于冷凉干～旱区栽培。中国可分为三大适栽区域；以西北为主的北方春播区，一年一料，春播（4～5 月）秋收（8～9 月）；黄淮海流域的北方夏播区，一年两料，夏播秋收，但需有补充水分；秦淮线以南的南方秋播区，11～12 月播种，翌年 4～5 月收获。后两区应为我国鹰嘴豆发展新区。新疆原为主产区，目前种植有大量的地方农家种，这几年育成的新品种如甘肃的“FLIP81-7C”、新疆的“A-1”、“88-1”等，均适于西北春播利用；能够适应我国中部夏播和南方夏秋播的品种类型较少，中国农科院品资所等一些科研单位正在引种、育种和开发研究。

7.2.6.4 抗旱高产栽培措施

豆类作物类型繁多，但从特性及栽培制度、生产管理上，也有共同之处。

① 准确定位　要从指导思想和种植结构调整中给豆类作物一个恰当定位。定位一，填空补闲和调节饮食；定位二，肥地养地；定位三，轮作倒茬；定位四，工业、饲料、食品加工或外贸等产业原料。前三个定位具有历史沿袭性，也都是传统农业的组成部分。定位明确后，就须引起足够重视，从种植面积、栽培制度、管理方法、产量和品质指标等方面落实配套技术措施。

② 选定品种　每一个豆类作物都有许多不同的适应性品种，要根据当地生态条件和作物产品用途（如用作粮食、饲料、蔬菜、加工或外贸等等），选用恰当的品种。必须先引种试验后推广利用。

③ 确定种植制度　无论是规模发展还是小面积种植，地方农业都需要一个完整而配套的种植制度。发展豆类作物，应当有与之搭配的禾谷类或其他作物；应当有减轻或避免毁灭性灾害的措施；应当考虑温光、土地、水利、人畜力、机械等资源的合理配置问题；应当考虑经济支持与回收问题等等。

④ 以土为本，精细耕作　地形地貌和基本土质一般难以改变，也无须花大气力去改变，重要的是增加土壤有机质、培肥地力、保土蓄水、深翻精耕。干旱半干旱地区要坚持实施以蓄水保墒为核心的耕作制度：春播区须保证冬前深翻，开春及早顶凌耙耱、平整合墒；秋播区应重视及早灭茬和深翻晒垡（正茬）、浅耕碎土（回茬）、耙耱镇压等措施。

⑤ 合理施肥　豆类作物多喜有机肥。多施有机肥不仅能促使作物长势稳健，水分利用率高，也能显著促进根瘤菌活性而提高固氮能力。有条件时每公顷施用有机肥 75000kg。豆类作物虽能固氮，但它自身并不能利用该氮，故其生长期间仍需要较多的氮、磷、钾补充。据测定，一般豆类作物每生产 100kg 籽粒，需 N、P_2O_5、K_2O 分别为 5kg、1.7kg、4.8kg，蚕豆需肥量更大，应超标准量施用，豌豆和扁豆则可小于标准量。旱地和瘠薄地都应将各类化肥与有机肥并作基肥，结合播前整地一次施入；有补灌条件可留 20%左右的氮肥于花实期结合灌水追施。

⑥ 适期精播　首先争取适期播种。春季早播地温不足容易烂籽，夏季晚播会

缩短有效生育期，秋季早播会招致虫害加重和冬旺受冻，因此应做到春播不抢早，夏播不延时，秋播不争先。春播以 10cm 地温稳定通过 12℃下种较好；夏播遇墒情好则施入底肥、浅耕（旋耕）灭茬、平整碎土、精细抢种，墒情差则抢时溜补小水，然后合墒细整抢种；秋播一般时间充足，可从容细整地、精播种，切勿抢时早播，以免出苗过早而引虫入地或冬前苗旺而受冻。二是要根据品种特点确定适宜的密度和播种量。单作专栽时公顷留苗密度可参考以下标准：短日照豆类高水肥春播的大粒大株（如蚕豆）4 万～8 万，中粒中株（如大豆、绿豆、小豆、豇豆、普通菜豆等）7 万～15 万；旱薄地春播或水肥地夏播，均可相应增苗 50%～100%；长日照豆类：豌豆大株 15 万～30 万，中小株 30 万～60 万，扁豆 60 万～80 万，鹰嘴豆 15 万～30 万；高水肥密度趋低，旱薄地或夏播时适用高密度。根据留苗密度、种子大小、播种方法（穴播或条播）等因素加上适当保证系数（一般为种量的 20%左右），即可确定播种量。三要重视播种质量。豆类作物种子萌发吸水量大，双子叶顶土困难，干旱地播种浅时土壤水分无法满足种子吸水要求，黏湿地播种深时顶不出土或出土后形成弱苗，加之豆类作物株行距一般较大，一苗（穴）不出便有空地，所以播种质量关系重大。播种深度应掌握 4～6cm，穴播忌深，条播忌浅，旱地宜深，湿地宜浅，大粒略深，小粒稍浅，播种后遇雨应合墒破除板结。

⑦ 加强田间管理　豆类作物不是懒庄稼，作务要精细。在坚持及时间苗、定苗、多中耕、勤除草等传统作务的基础上，还需根据各豆类作物的个性特点增加措施。豆类作物吸收利用水肥高峰是花荚盛期，夏作区常遇干旱缺水或脱肥，应及时补充。豌豆和蚕豆等既怕旱又怕涝，高水肥和多雨区都要提前做好灌、排水渠、埂，干旱及时灌溉，雨涝及时排水。蚕豆对硼敏感，可加施硼肥；长势旺盛、分枝较多时应增加整枝措施，及时去杈打顶。绿豆、小豆、豇豆、菜豆等易招生蚜虫，需及时防治。具有无限结荚和逐渐成熟习性的豆类，成熟后荚易爆裂，需多次采摘或及时收获。

⑧ 采用高产增效技术　大部分豆类作物对地膜覆盖反应敏感，增产幅度较大，用于短日照喜温和大株型低密度的豆类作物，以及干旱缺水区或春播区栽培，效果都很明显。低产高密度豆类如扁豆、豌豆等、其他豆类夏、秋作以及旱瘠低产田块，可采用秸秆覆盖技术。一些缠绕蔓生、耐阴、高产的豆类如绿豆、豇豆、菜豆等，可与玉米、高粱、向日葵等高秆作物套种；短日照中矮秆豆类可与棉花、甘薯、马铃薯等套种，也可在北方夏播和南方夏、秋播中与水稻、小麦、大麦等作物间作；旱薄地豌豆可与小麦、大麦等作物混作。各地应根据具体生态条件、生产水平和适应性作物特点，灵活运用适用技术，建立起良性循环的栽培制度，就能促进增产增效。

综上所述，旱农在中国乃至世界农业发展史上占有重要地位。在水资源日趋紧张的今天，节水农业的地位更加突出。坚持综合利用作物及其品种资源的耐旱特性、传统的抗旱耕作措施和不断进步的节水技术，建立一个可持续发展的现代农业

体系，为人类的生存和发展作出更大贡献。

参 考 文 献

[1] 贝时璋等．中国大百科全书：生物学卷［M］．北京：中国大百科全书出版社，2000.
[2] 金善宝等．中国大百科全书：农业卷［M］．北京：中国大百科全书出版社，2000.
[3] 王立祥．论“北粮南运”与我国水资源合理利用［J］．干旱地区农业研究，2001，19（1）：1-7.
[4] 金善宝．中国小麦品种及其系谱［M］．北京：农业出版社，1983：336-391.
[5] 庄巧生．中国小麦育种研究进展［M］．北京：中国农业出版社，1996：532-541.
[6] 刘世林．陕西农业种子50年［M］．西安：陕西科技出版社，1999：345-373
[7] 王维帮．旱地小麦新品种选育［M］//中国小麦育种研究进展．北京：中国农业出版社，1996：159-172.
[8] 胡荣海．抗旱性研究及其进展［M］//中国小麦育种研究进展．北京：中国农业出版社，1996：279-286.
[9] 信迺诠．中国北方旱农区域治理与发展［M］．北京：中国农业出版社，1997：46-50.
[10] 邢胜利．陕西省农作物地膜栽培发展现状与展望［J］．干旱地区农业研究，2002，20（1）：10-13.
[11] 肖恩时．地膜小麦膜下微灌施肥的技术效果［J］．麦类作物学报，2002，22（1）：84-86.
[12] 刘玲玲．渗灌条件下覆盖对旱区冬小麦增产效应研究［J］．干旱地区农业研究，2001，19（1）：48-53.
[13] 古世禄．谷子的水分利用及节水研究［J］．干旱地区农业研究，2001，19（1）：10-17.
[14] 任洪志．甘薯优良品种与高产栽培［M］．郑州：河南科技出版社，1998：22.
[15] 袁宝忠．甘薯马铃薯栽培［M］．北京：农业出版社，1984.117-124.
[16] 王殿武等．高寒半干旱区马铃薯聚垄集肥覆膜技术［J］．干旱地区农业研究，2001，19（1）：14-19.
[17] 林汝法等．中国小杂粮［M］．北京：中国农业科学技术出版社，2002.
[18] 高小丽等．特色杂粮产业技术问答［M］．杨凌：西北农林科技大学出版社，2009.

第 8 章　地下水源的开发与利用

8.1　地下水分类、分布与富集规律

8.1.1　地下水的分类

地下水有广义和狭义两种概念。广义的地下水是指赋存于地面以下岩石空隙中的水，包气带及饱水带所有含于空隙中的水均属此列。狭义的地下水仅指赋存于饱水带岩石空隙中的水。

地下水的赋存特征对其水量、水质时空分布等有决定意义，其中最重要的是埋藏条件与含水介质类型。

所谓地下水的埋藏条件，是指含水岩层在地质剖面中所处的部位及受隔水层限制的情况。据此可将地下水分为包气带水、潜水及承压水。按含水介质类型，可将地下水区分为孔隙水、裂隙水及岩溶水。将两者组合可分为 9 类地下水，见表 8-1。

表 8-1　地下水分类

埋藏条件 \ 含水介质类型	孔隙水	裂隙水	岩溶水
包气带水	土壤水局部黏性土隔水层上季节性存在的重力水（上层滞水）过路及悬留毛细水及重力水	裂隙岩层浅部季节性存在的重力水及毛细水	裸露岩溶化岩层上部岩溶通道中季节性存在的重力水
潜水	各类松散沉积物浅部的水	裸露于地表的各类裂隙岩层中的水	裸露于地表的岩溶化岩层中的水
承压水	山间盆地及平原松散沉积物深部的水	组成构造盆地、向斜构造或单斜断块的被掩覆的各类裂隙岩层中的水	组成构造盆地、向斜构造或单斜断块的被掩覆的岩溶化岩层中的水

8.1.2　地下水的基本类型与富集规律

8.1.2.1　不同埋藏条件下的地下水

地下水的形成和分布是千差万别的，但是它的存在总离不开地质环境。在水文

地质剖面上，以地下水面为界，可分成包气带和饱水带（或称饱和带）。自地表到地下水面之间的岩（土）层为包气带，空隙中既有空气，又含有地下水，这部分地下水称为包气带水；在地下水面以下的岩（土）层为饱水带，这一带的空隙中充满地下水，按埋藏条件的不同又可分为潜水和承压水。

（1）包气带水

包气带水存在于包气带中，可分为非重力水和重力水两种。非重力水主要是指结合水和毛细水，这种水不能直接被人们取用，它是植物的补给水源。包气带中往往有不透水或弱透水的黏性土“透镜体”，其上截留有从地表涌入的重力水。它分布的范围不广，当地气候对其影响较大，久旱则枯竭，雨后又出现，是一种临时性的地下水，通常称之为上层滞水（图 8-1）。

包气带表层的含水量，由于受气象的影响，处于经常变动状态，往下含水量变化趋于稳定。垂直剖面上含水量的分布可分成三个层次：水分积极交替层、过渡层、毛细水层。

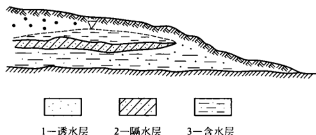


图 8-1 上层滞水

（2）潜水

潜水是指埋藏在饱水带中第一个连续分布的隔水层以上具有自由表面的重力水（图 8-2）。一般埋深不大，便于开采，是主要的地下水开采水源。

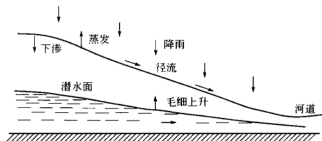
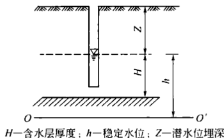


图 8-2 潜水埋藏

潜水的自由水面称为潜水面；从潜水面到隔水层顶面的垂直距离称为潜水层的厚度（H）；从地面到潜水面的垂直距离称为潜水埋藏深度，简称潜水埋深（Z）；从潜水面到参考基准面的垂直距离称为潜水位（h）（图 8-3）。



H—含水层厚度；h—稳定水位；Z—潜水位埋深

图 8-3　潜水位

① 潜水的基本特征

潜水的基本特征相对于承压水而言，表现在以下三个方面：第一，由于潜水面之上，无连续稳定的隔水层存在，因此潜水具有自由表面，当用钻孔揭露潜水含水层时，初见水位与稳定水位相一致；第二，潜水含水层通过包气带，与地面相通，因而潜水分布区都可以接受大气降水的补给，补给区和分布区相一致，因此气象因素与地表水文因素的变化将影响潜水的动态；第三，潜水在重力作用下，由潜水位较高的地方向潜水位较低的地方流动，即由势能大的地方向势能小的地方运移，其运移的速度取决于势能梯度（水力坡度）和含水层的透水性。

综上所述，潜水的基本特点是与大气圈及地表水圈联系密切，积极参与水循环。

② 潜水的补给和排泄

潜水是大陆水循环系统的一个组成部分，它不断地获得补给，形成径流，又不断地排泄消耗。

a. 潜水的补给

大气降水垂直渗入是潜水最主要的补给来源，潜水获得降水渗入补给后，潜水位升高，旱季少雨，水位则下降。地表水（包括河流、湖泊和水库）的入渗也是潜水补给的重要来源，在干旱地区，如果离开了河水的补给，潜水就会很快枯竭。河水对潜水的补给，在河流下游最为突出（图 8-4）。

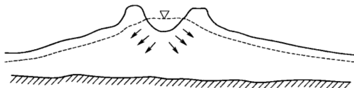


图 8-4　下游河水渗漏

例如我国著名的黄河下游黄泛平原现代河床高出两岸地面，大量的河水下渗补给潜水；在河流中游，河水位与潜水位的关系随季节而变。洪水期河水水位比潜水位高，河水补给潜水，枯水期则相反；在河流上游，河谷深切，潜水位常年高于河水位，潜水向河流排泄；在山前地带，堆积作用加强，河床抬高，潜水位埋深较

大，因而冲洪积扇经常是河水补给潜水。

潜水另一个补给是越流补给。当下部承压含水层测压水头高于潜水位时，承压水能越过透水性弱的相对隔水层（弱透水层）补给潜水，这就是越流补给。相对隔水层越薄，两含水层之间水头差越大，则越流补给量越多。还有一种越流是下部承压水直接通过“天窗”（相对隔水层的间断部分）补给潜水（图 8-5）。

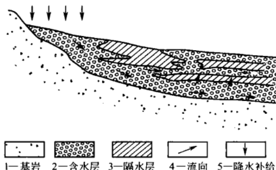


图 8-5 越层补给

凝结水也是潜水的一项补给来源，凝结水补给潜水主要在高山和沙漠等昼夜温差大的地区比较明显。

除上述天然补给外，潜水还得到人工补给，如水库、渠系、田间地区的渗漏补给。不仅如此，有些地区还专门修建一些工程将大气降水、地表水引入或注入地下，这就是人工回灌补给地下水。

b. 潜水的排泄

潜水的排泄包括排泄方式和影响排泄的条件。潜水的排泄方式可分成垂直排泄和水平排泄。潜水的垂直排泄一个重要途径是潜水蒸发，尤其在河流的中下游平原地区，地形平坦，沉积物颗粒细小，地下水埋藏浅，径流缓慢，蒸发成为潜水天然消耗的主要途径。潜水垂直排泄的另一个途径是人工开采。有些地区人工开采量远远超过潜水蒸发量，已成为当地潜水垂直排泄最主要的方式。潜水垂直排泄的再一个途径是越流排泄，当潜水面高于相邻承压含水层的压力面时，潜水有可能透过弱透水层渗入下部承压含水层。

潜水水平排泄，一是沿水平方向流出含水层，在地表出露，形成下降泉；二是汇入河流、湖泊等地表水体变成地表径流。

潜水的排泄条件：潜水的排泄主要受地形和埋深条件的控制，气候和岩性条件也有一定的影响。地形条件是指地形切割程度和排泄基准面的相对位置。地形的切割程度包括切割深度和水文网密度。河床切割深度越大，河网越密，则潜水水平排泄条件越好。例如山区河流深切，泉水很多，潜水大量地泄入河谷；在平原地区地势平坦，河床淤积增高，潜水只能以垂直排泄为主。

排泄基准面是指排泄潜水的河流、湖泊的枯水位平面。排泄基准面与潜水补给

区的高差越大，地下水的排泄条件越好。潜水埋藏越浅，土的颗粒越细，气候越干燥，则潜水的蒸发强度越大。随着埋深的增大，蒸发相应减少。

潜水的径流：潜水不断地从补给区流向排泄区形成地下径流。由于地下径流是在一定的补给、运动、排泄条件下形成的，所以，控制和影响地下水补给、运动、排泄的各种因素也是影响地下径流的因素，如降水、蒸发、岩石透水性、地形、切割程度等。

地下径流的流向总趋势是由补给区流到排泄区，从高水位处流向低水位处。但实际情况是复杂的，根据其流线形态可分成散流型、汇流型、缓流型和畅流型。

Ⅰ. 散流型。地下水流线在平面上呈放射状分布，如山前冲洪积扇中的潜水流从出山口流出后以扇形（放射状）散开。

Ⅱ. 汇流型。与散流型相反，流线由分散趋向集中。如小型山间盆地潜水汇集于出山口；岩溶水集中于泉口溢出等。

Ⅲ. 缓流型。流线平行，水力坡度很小，径流微弱，水交替以垂直方向为主，如河流中下游沉积平原中的孔隙水。这种地下水矿化度高，水质较差。

Ⅳ. 畅流型。如河谷潜水、地下暗河中的岩溶水。它们的流线在平面上大致平行，但水力坡度较大，径流畅通，水交替以侧向为主。蒸发微弱，一般水质较好，矿化度低，是良好的地下淡水资源。

但是，野外实际情况错综复杂，不一定是单一的径流形态，往往是过渡的或复合的类型。

(3) 承压水

承压水是指充满于两个隔水层（弱透水层）之间的含水层中的地下水。上部隔水层（弱透水层）的底面称为隔水顶板，下部隔水层的顶面（弱透水层）称为隔水底板。如果其间含水层充满了地下水，这种含水层称为承压含水层。如果含水层未能被地下水充满，其中地下水性质则与浅水相似，称为无压层间水。

承压含水层隔水顶板到底板的垂直距离称为含水层厚度（M）；当钻孔刚开始凿穿隔水顶板时，在钻孔中出现的水位称为承压水初见水位（H_1），这个水位等于隔水顶板的高程；如果继续钻进，承压水将沿钻孔上升，最后稳定的水位即为该处的测压水位或称承压水位（H_2）（图 8-6）；自隔水顶板到测压水面之间的垂直距离称为该处的测压管高度（h），它表示该点隔水顶板所承受的水压力值。测压水位高于地表时，钻孔能自喷出水。

① 承压水的基本特征

承压水与潜水相比，主要特征如下。

a. 承压含水层具有连续完整的隔水顶板，而没有自由水面，钻孔中的稳定水位高于初见水位。

b. 承压水补给区与分布区不一致，补给区位于承压水的一侧，排泄区在另一

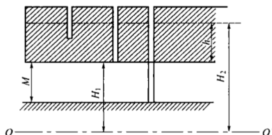


图 8-6　承压水测压水位

侧。由于受上部隔水层的限制，承压分布区的水量、水质、水温受气候影响较小，季节性变化与年际变化都不大，它的动态具有相对稳定性。

c. 承压性是承压水的最重要的一个特征。由于补给区位置较高，水从补给区进入分布区后，受到上部覆盖层的约束，使地下水承受压力，水也以一定的压力反作用于隔水顶板上。这一点，钻孔中的测压水位高于隔水顶板是最好的见证。

② 承压水的补给、排泄

承压水的补给来源，主要也是大气降水和地表水。补给范围越广，则水量越大，且流量稳定。当上下顶底板为弱透水层时，只要有足够的水头差，也可以通过弱透水层与其上下的水体发生水力联系，获得越流补给。

承压水的排泄，主要以上升泉的形式在排泄区溢出。与地表水体（如河、湖、海洋）相通时即转化成地表水，如与潜水含水层沟通，则以补给潜水方式排泄承压水。

承压水的补给和排泄是通过径流来完成的，径流条件受补给区和排泄区的水头差、含水层的透水性等因素所影响。当补给区和排泄区的水头差越大，含水层透水性越强，则径流畅通，反之则差。

承压含水层补给区的形成、排泄区的出露、径流的畅通与否在很大程度上受地质构造因素的控制。在分析承压水的补给、排泄、径流的关系时，必须抓住地质构造这一环节，然后综合因素进行分析，才能得出正确的结论。

③ 承压含水层形成条件

由隔水层与含水层组合而成的能够富集地下水的地质构造形体称为蓄水构造。承压水的蓄水构造，有下列三个基本要素：

a. 上、下相对隔水层，构成承压蓄水构造的隔水边界；

b. 透水的岩层或岩体，构成承压蓄水构造的含水介质；

c. 补给区水位高于排泄区，形成地下水流的承压性。

按地质构造的不同，大体上承压蓄水构造有：承压向斜蓄水构造和承压单斜蓄水构造、承压断裂蓄水构造。

8.1.2.2　不同含水介质中的地下水

赋存地下水的岩土称含水介质。含水介质内部的空隙已如前述，按其性质可分

为孔隙、裂隙和溶隙。据此，将赋存于其中的地下水亦相应分为孔隙水、裂隙水和岩溶水（喀斯特水）等三类。由于含水介质的岩层所受的地质历程和地质作用不同，因此赋存其间的地下水的富集程度和分布规律也各异。

（1）孔隙水

孔隙水是指埋藏和运动于松散沉积物颗粒间孔隙中的重力水。在我国东部及北部河谷地区和山前倾斜平原，如松辽平原、黄淮海平原、江汉平原、河流三角洲等地区，广泛分布着各种成因类型的第四纪未胶结的沉积物，其中埋藏着丰富的地下水，已成为这些地区具有十分重要意义的工农业供水水源。

孔隙水的基本特征是分布较均匀，呈层状，含水层内水力联系密切，具有统一的潜水面或测压面，这是孔隙含水层中孔隙分布较均匀、连通性较好所致。但孔隙水的这些特征是相对的，由于含水层所处的地貌单元、岩性成因类型和水文气象条件不同，还是有较大的差异。

（2）裂隙水

裂隙水是指埋藏在第四纪以前的坚硬和半坚硬岩层裂隙中的地下水。岩石中的大小裂隙互相切割、交叉，构成疏密相间的裂隙网脉，地下水就赋存在大大小小的裂隙网脉中。大的破碎带或溶洞，地下水在其中流动快，储存量也丰富。而细小的裂隙网脉，地下水在其中流动慢，水量少。基岩裂隙水主要分布和运动在这些大的张开的裂隙发育带中。

基岩含水和隔水边界的分布，在多数情况下，不受岩层和岩体形态控制。我们知道，松散沉积物含水层、隔水层一般与岩层边界是一致的，但在基岩中，不仅有与岩层层位相一致的层间裂隙含水层，还有完全不受层位限制的含水破碎带，它切穿不同的岩层。在基岩裂隙水的研究中，除了使用“含水层”这一术语外，还应当确立“含水带”的概念，而且含水带是基岩地下水分布的主要形式。凡是地下水埋藏分布与岩层分布一致者称为含水层；凡是不受岩层层位限制的而主要受地质构造控制的含水形式，均称为含水带。

（3）岩溶水

凡是埋藏和运动于可溶性岩石中的重力水统称岩溶水。可溶性岩类中的碳酸盐岩在我国分布广泛，裸露面积约 125 万平方千米，约占全国总面积的 1/8，如果包括覆盖和深埋的面积，则达 200 万平方千米以上，差不多全国各个大区都有碳酸盐岩分布，尤以广西、贵州和云南东部分布广泛。

碳酸盐岩地区最引人注目的是它特异的地貌，又称喀斯特地貌，如峰丛、峰林、孤峰、残丘、溶蚀洼地、落水洞、溶洞和地下暗河等，特别是长期处于湿热环境的我国南方，这种岩溶地貌特别发育，它不仅以风景优美引人入胜，而且以其储存汇集大量的地下水，对工农业生产、人民生活具有十分重要的意义，为人们所重视。

8.1.3 地下水分布及富集规律

8.1.3.1 松散沉积物孔隙水

我国自中生代中期以来，大陆区域相继形成了一系列大小不等的构造盆地，特别是在东部地区出现了规模较大的平原，其中堆积了不同厚度、不同成因的第四纪松散沉积物。总的特点是，秦岭—昆仑山以北地区分布规模较大、分布面积广阔，沉积物厚度大，极有利于孔隙水的富集和运移，是目前我国地下水开发利用程度较高的地区；秦岭—昆仑山以南地区，盆地分布面积较小，沉积物厚度较薄。

（1）堆积平原冲、洪积层孔隙水　主要分布在我国东部的大平原。平原规模大、地形平坦，巨厚的松散沉积物的岩性主要为砂及砂砾石，结构松散，多呈层状分布。

（2）山间盆（谷）地冲积层孔隙水　在我国分布很广。由于山区局部受构造控制作用形成断陷盆地，经河流冲刷及松散沉积物的逐步堆积，出现规模较小、沉积厚度不等的山间盆（谷）地，这里松散沉积物孔隙水分布广泛，且水量较丰富。

（3）滨海平原冲、海积层孔隙水　主要在东部沿海地带。我国的海岸线长约18000km，是世界上海岸线最长的国家之一。三角洲地区常有砂砾石层呈镶嵌叠置。地下水径流总的趋势是较为滞缓，潜“水含”水层多为海相淤泥质黏土夹粉砂透镜体，水位埋藏较浅，含水层富水程度极弱，水质较差，但深部一般有承压水分布，埋藏深度各地不一。

（4）内陆盆地山带冲、洪积层孔隙水　盆地边缘地域辽阔，冲洪积物沉积巨厚。广布的山前倾斜平原，顶部常为戈壁砾石层。各盆地周边多为高山环绕，山顶终年积雪，为盆地的地下水补给提供了优越条件。

（5）黄土高原黄土层孔隙水　在我国的分布较广，但集中区域是黄河中下游地区，其特点是沉积厚度大且连续。黄土层中孔隙水的分布与降水有关，并严格受黄土地貌的制约。在黄土塬区和台塬区，由于塬面宽阔平坦，有利于降水汇集，且渗入补给条件较好，潜水分布普遍，含水层主要由孔隙、孔洞发育的黄土及古土壤层所构成，塬内水量和水位的变化取决于塬面大小和与冲沟的距离远近，以及黄土层的结构；在梁、峁等地区的黄土层中，黄土状土与粉细砂为主要含水层，厚度一般为10～40m，水位埋藏较深，水量较少，水质变化不大。

（6）沙漠风积砂丘孔隙水　我国沙漠面积约占全国陆地总面积的1/9，主要集中在北部和西北部的内陆盆地中部地区。沙漠分布地区气候极为干旱，蒸发强烈，地表水缺乏，地下水主要是埋藏于砂丘中的潜水或砂丘下伏的孔隙水。砂丘岩性以细砂、细粉砂为主，厚度由几米至几十米，颗粒均一。除塔克拉玛干外，砂丘中潜水分布普遍，常见于砂丘之间的低洼地带。

8.1.3.2 基岩裂隙水

我国是多山的国家，山区基岩出露面积约占全国总面积的2/3，包括有各个时

代的地层，从太古界至新生界均有出露。

（1）丘陵、高原碎屑岩裂隙水 碎屑岩类主要包括砂岩、砂砾岩、页岩等。岩石结构极密，且较脆硬，抗风化能力强，风化裂隙不甚发育，透水性微弱。但在构造作用下，往往产生延伸性较大的构造裂隙，从而有利于地下水的富集，出现富水地带。其富水程度大小与构造带的特征以及地貌有直接关系。

（2）山地、丘陵岩浆岩裂隙水 岩浆岩结晶致密，多呈块状或似块状结构，抗风化能力相对较弱，表层裂隙极为发育，其风化厚度一般 10～30m，局部地段大于 30m。因此浅部常常富含风化裂隙潜水，深部岩层含水甚弱或不含水。

（3）山地变质岩裂隙水 变质岩类分布地区地下水主要赋存于构造裂隙中，水量富集程度取决于构造的性质、不同岩层的组合关系及破碎带的胶结物充填程度等。

（4）熔岩孔隙裂隙水 主要指有成岩裂隙及气孔发育的玄武岩孔隙裂隙水赋存的熔岩出露地区。在我国的新生代地层的熔岩中，常伴随有发育良好的柱状节理和气孔构造产生从而为地下水的蓄积提供了良好条件，但其富水程度取决于玄武岩喷发的形成环境，埋藏条件及岩性等。

8.1.3.3 碳酸盐岩裂隙溶洞水

碳酸盐岩在我国分布较广，裂隙溶洞水赋存丰富，其特点是水量丰富，分布不均匀，不仅在区域分布不均匀，而且不同时间的水位和水量变化都很大，但大区域范围的水质变化很小，且矿化度较低。碳酸盐岩类分布区域的自然条件各不相同，岩溶发育程度和岩溶地貌各有差异，直接制约着裂隙溶洞水的赋存条件。根据碳酸盐岩类的埋藏条件及其地貌特征，分为以下类型。

（1）峰丛峰林裂隙溶洞水 主要分布在我国最南部的珠江流域地区。这里气候炎热，雨量充沛，碳酸盐岩层分布广阔、厚度大、岩性纯。

（2）岩溶丘陵裂隙溶洞水 主要发育在岩溶丘陵与溶蚀洼地相组合的地貌景观地区。这里地下河及溶洞均较发育，为地下水的蕴藏提供了有利条件。

（3）岩溶山裂隙溶洞水 主要分布在我国北方地区，特点是地表岩溶不太显著，仅发育有溶沟和溶槽等地貌形态区域，以岩深水溶泉出露为主要特征。在华北地区碳酸盐岩层厚达 1000m 以上，地下岩溶形态主要是溶孔和小型溶洞，一般直径为 0.2～0.5m。因此大型岩溶泉出露较多，由于补给区域范围宽广，故泉水流量大且相对稳定。

8.1.3.4 多年冻土冻结层上水

我国多年冻土分布面积约占全国面积的 1/5 左右。主要分布在东北和西北的最北端及青藏高原地区，它们各具独自的特征，前者在水平方向呈现纬度分带规律，后者在垂直方向上具有高度带规律。据此分为高纬度山地和中、低纬度高原孔隙裂隙水。山区地势高耸，褶皱断裂及构造裂隙极为发育，山峰均为终年积雪，这些积雪对地下水的补给带来有利条件。多年冻土在我国的分布，具有面积大和连片广泛

的特点。

冻土层厚度一般为几十米到百余米，其厚度大小随地形起伏的变化，并在水平方向的变化较大。总观冻土地区，冻结层上水分布普遍，多在地形相对低洼或山坡地带，主要接受大气降水或冰雪融水的补给，水质良好，但水量较小，作为供水水源利用有一定的局限性。冻结层下水具有承压性，并往往受冻土层厚度变化影响和地区构造的控制。所以断陷谷地和盆地是冻结层下水储存的良好场所。在 10～50m 厚度的多年冻土层下，普遍有承压水或自流水分布。此外，境内多咸水湖，仅青海省就约有 80 多个。

8.2 地下水资源的调查与评价

8.2.1 地下水资源的调查手段与方法

地下水源普查，主要通过对区域地下含水层水文地质条件和地下水开发利用情况的调查分析，掌握地下水资源数量、质量、时空分布特征及地下水开采利用现状，为加强地下水的管理，科学合理开发利用地下水，有效保护地下水资源、控制地面沉降提供科学依据，也为促进水资源的合理配置和科学管理打下基础。其普查内容主要包括：

① 浅层地下水（包括微咸水）和深层地下水的数量（储量）及其时空分布调查；

② 地下水化学类型调查及其水质评价；

③ 地下水的开采利用及其分布情况；

④ 地下水超采等引起的地质灾害等生态环境问题调查。

8.2.1.1 地下水源的调查要求

（1）基础资料的调查

主要包括地形图、地貌图，包气带岩性、厚度及结构特性，含水层级弱透水层水性或隔水层顶板埋深、岩性、厚度及结构特征。

① 水文气象资料调查　主要包括湖库、河流水系分布及其水文特性（含湖库水面面积、容量、水位和出入湖库水量，主要河流断面的过水时间、流量和水位），降水量、水面蒸发量、河川径流量以及用于河川基流分割的选用水文站的系列资料。

② 渠系引灌　主要针对渠道系统对地下水位的影响进行调查，包括干、支两级渠道的分布、长度及重点过水断面的过水时间、流量及水位，渠首引水量、渠系的有效利用系数，以及渠灌区和井灌区面积及灌溉定额，田间灌溉水量。

③ 地下水位动态监测资料收集　主要收集区域内主要监测井的地下水位和地下水埋深资料，可绘制地下水历年的动态变化曲线。

④ 其他调查试验资料收集　要收集调查研究地区的水均衡试验场、抽（压）水试验等试验资料，以及其他地下水的调查研究和开发利用资料。

（2）主要分析成果

地下水资源调查的主要调查分析成果应包括：

① 地下水资源量评价类型区分布图；

② 浅层地下水多年平均降水入渗补给量模数分区图；

③ 多年平均浅层地下水资源量（$M \leqslant 1g/L$）模数分区图；

④ 各水资源分区降水入渗补给量计算成果表（$M \leqslant 1g/L$）；

⑤ 各水资源分区多年平均浅层地下水资源量计算成果表（$M \leqslant 1g/L$）；

⑥ 各水资源分区平原区深层承压水净储量及多年平均资源量计算成果表（$M \leqslant 1g/L$）；

⑦ 各水资源分区水化学类型分布图；

⑧ 各水资源分区水质评价分布图。

8.2.1.2　地下水资源量的调查与计算

地下水资源数量调查内容应当包括补给量、排泄量、可开采量的计算和时空分布特征分析，以及人类活动对地下水资源的影响分析。地下水补给量是指单位时间内流入含水层的地下水量，其中包括天然补给量、开采补给增量和人工补给量等。地下水排泄量包括潜水蒸发量、河道排泄量、倾向流出量等，各项总排泄量之和为总排泄量。地下水可开采量是指在经济合理、技术可能且不发生因开采地下水而造成水位持续下降、水质恶化、海水入侵、地面沉降等水环境问题和不对生态环境造成不良影响的情况下，允许从含水层中取出的最大水量。为便于分析研究，在计算过程中，对各含水层（组）的地下水资源应分层进行计算。

（1）潜水资源计算

潜水的形成以大气降水入渗补给为主，其次为地表水体补给；排泄以蒸发为主，少量向河、海以径流方式排泄。因此，潜水资源量的计算，宜采用包括补给量、排泄量、调节储量等的均衡法计算。

（2）承压含水层资源计算

① 弹性储存量　在开发利用地下水的过程中，各含水层地下水亦遵循补给、储存、排泄三者数量互相转化规律，在有开采保证的各个历史时期，该储存量所起的是开采调节作用，最终都能使三者关系达到相对的动平衡。按各含水层咸淡水分布计划分计算块段，给出弹性释放系数，分别计算水位降至承压含水层顶板时的储存量。

② 承压含水层可开采量　以行政区域作为计算范围，根据水文地质研究程度及地下水开发利用现状，充分利用长期的地下水灌采量、水位监测及土层变形测量资料，按渗流力学的原理与方法，遵循地下水运动的原理和规律，建立地下水流的准三维渗流数学模型，根据工程地质条件及土层变形和释水规律，按一维固结理论

建立水流-沉降耦合数学模型，对地下水流运动及土层变形进行有限元数值模拟。

8.2.1.3 地下水化学类型及水质评价

(1) 地下水化学类型及其分布

地下水是由各种有机物和无机物组成的天然溶液。由于地下水与岩石、土壤发生了相互的物理和化学作用，使地下水中溶解有各种不同的离子、分子、化合物和气体，水化学成分通常以离子形式表现，最主要的离子有 Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-} 等阴离子，H^+、Na^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等阳离子，同时还含有未分解的 Fe_2O_3、Al_2O_3 等化合物，以及微量气体和放射性元素。

水的矿化度（M，单位：g/L）是指水中离子、盐分、胶体含量的多少，是地下水化学成分的重要指标。在通常条件下，低矿化度的水常以重碳酸根离子（HCO_3^-）为主要成分，中等矿化度的水常以硫酸根离子（SO_4^{2-}）为主要成分，高矿化度的水常以氯离子（Cl^-）为主要成分。因此，可根据矿化度对地下水进行分类：淡水（$M\leqslant 1g/L$），微咸水（$1g/L<M<3g/L$）、半咸水（$3g/L\leqslant M<5g/L$）、咸水（$M\geqslant 5g/L$）。

(2) 地下水水质污染调查

① 水质调查的主要指标

地下水调查的主要水质监测项目可分为必测和选测两类。必测项目主要是一些对地下水水质变化的主要影响因子和可能造成地下水严重污染的因子，包括 pH 值、矿化度（M）、总硬度（以 $CaCO_3$ 计）、氨氮、挥发性酚、高锰酸盐指数、总大肠菌群等。选测项目是一些可能影响地下水质量的重要因子和重金属等污染因子，可根据各地实际情况选用，包括氟化物（以 F 表示）、氯化物、氰化物、砷、硝酸盐、亚硝酸盐、铬（六价）、汞、铅、锰、铁、镉、化学需氧量以及其他有毒有机物或重金属等水质监测项目。

② 主要调查方法

调查资料统一采用枯水期水质监测资料。要求每个基本评价单元至少有一个以上资料质量较好且具有代表性的水质监测点的资料。对基本评价单元面积超过 500km^2 或存在地下超采区或地面水回灌区，选用的监测井必须加密。如评价单元内监测资料较多，可采用面积加权法进行资料的统计处理。

对选用的监测井，必须详尽地记录监测井的资料，以及监测项目的名称、监测起止年份、检测值，并计算监测起止时间相应数值的年平均值、增减变化和年均变化率。

要求能绘制地下水的 pH 值、矿化度、总硬度的现状分布图，对存在铁、砷、氟等水文地球化学异常的地区，要求能绘制相应项目的异常区分布图。

要求调查可能引起地下水污染的污染源，包括水质低劣的地表水体（如排污河道、纳污湖库塘坝）、污灌区和农药施用量较高的农田、废弃物堆放场等，以及海

水入侵、地下咸水入侵淡水含水层、地下水回灌引起的地下水污染等。

8.2.1.4　地下水开发利用状况调查

地下水的开发利用状况调查主要针对利用地下水的水井工程的开采量调查，以及与开采利用相关的资料调查。地下水开采量按浅层水和深层水分别调查统计，浅层水包括潜水和弱承压水，深层水应分不同承压含水层单列统计。对于具有回灌资料的地区，还需调查回灌井的回灌状况。调查资料要包括每个井的分布、开采层数、取水能力、实际开采量。同时，对岩溶水和基岩裂隙水的实际开采量资料也要进行调查。

城市地下水水源水量应以自来水的计量资料作为主要依据，同时调查统计自备井的开采量。农灌井开采量的计量资料一般不齐，无计量资料的可根据配套的机电井数和调查确定单井出水量（或单井灌溉面积、单井耗电量等资料）估算开采量，但应进行分析和平衡校验。

对于地下水回灌地区，应详尽调查回灌井的回灌层次、回灌量、采灌比等数据。

调查成果应绘制地下水开采分布图等图件，便于研究不同地区的采灌量与地区资源的利用比率。

8.2.1.5　地下水超采等引起的地质灾害等生态环境问题调查

地下水超采引起的地质灾害和生态环境问题调查，应包括地下水降落漏斗、地面沉降、地面塌陷、地裂缝、海水入侵、咸水入侵和土地沙化等。对地下水漏斗应调查统计漏斗面积、中心水位埋深、下降速率及累计超采量；对地面沉降要调查统计沉降面积、最大降深及沉降速率；对海水、咸水入侵调查要统计入侵面积、入侵层位及入侵速度；对土地沙化要调查统计沙化面积、扩展速度和地下水埋深。

8.2.2　地下水资源的概略评价

地下水资源评价涉及的范围很广，也很复杂。这里仅就以下几个方面进行论述。

8.2.2.1　地下水资源评价方法的分类

地下水资源评价方法，根据不同的出发点可以分成不同的类型。

（1）按开采的范围大小及开采强度分类

① 局部（或称集中）开采区的地下水资源的评价方法

所谓局部开采区是指开采区在整个地下水流域中所占的面积比较小；或者开采的时间不长，开采形成的地下水降落漏斗不仅在整个地下水流域中的影响范围不大，而且该漏斗与其附近地区的地下水降落漏斗无明显的联系；或当集中开采区附近有大面积的井灌区（即在大面积井灌区内有集中开采区），但井灌区的机井密度很小，而且用水量远比集中开采区用水量少，两者相比，前者可以忽略不计时，均可成为局部开采区。显然，局部开采也就是指无限含水层地区或不考虑边界条件影

响的地区。

由上可见，局部开采区的定义并不十分严格，只能是近似的。属于局部开采区地下水资源评价的方法主要有以下几种。

a. 非稳定流计算法。是指利用地下水非稳定流微分方程式在不同边界条件下的解析解和数值解，预测地下水位借以评价地下水资源的方法。

b. 相关分析法。根据地下水动态要素与气象因素或其他因素的成因关系，通过相关计算得到为地下水资源评价需要的相关关系。例如根据开采量 Q 与其相应水位降 S 间的相关关系来评价地下水资源。

c. 抽水试验法。通常在水文地质条件下比较复杂而又没有地下水长期观测资料的地段，可以通过较长时间的抽水评价地下水资源。这种方法一般是把较长时间段的稳定流量作为评价地下水资源的依据。

d. 稳定流计算法。当地下水的运动不随时间变化，或者随时间变化但变化不大的地段（例如补给条件好的，开采量不大的地段），可以直接用地下水的稳定流公式评价地下水资源。

② 区域地下水资源评价方法

地下水的区域一般是指开采区的范围比较大，总井数多，总开采量大，但单位面积的开采量（或称开采模数）往往比局部开采小。主要评价方法有以下一些。

a. 水文学法。在降水入渗机制以蓄满产流为主的地区，以流域水量平衡为依据，用水文学的方法评价地下水，称为水文学法。该法把研究区（即流域）的地下水储存空间视为水库（称为地下水库），通过对地下水的调节计算，确定其灌溉保证程度，当灌溉保证率过低时，提出其他措施，以求满足用水的需要。

b. 水量平衡法。依据质量守恒定律，建立区域的任一段时间的水量平衡方程式，逐时段地计算地下水补给量和地下水位降（或水位），进行年或多年调节，评价地下水资源。

c. 模拟法。当自然条件和人为因素比较复杂时，地下水运动的许多问题用解析法难以解决，甚至无法解决时，可以用模拟法进行地下水资源评价。模拟法可以分为两类，一类是用岩石样品制作的模型；另一类是根据渗流现象和其他物理现象间的相似性，在特殊模型上进行模拟，如电模拟等。

d. 非稳定流法。在区域开采条件下，区域内水文地质条件变化比较大、边界条件不规则甚至相当复杂，非稳定流的解析解已无法使用，只能用数值解评价地下水。数值解常用的有两种，即有限差分法和有限单元法。

e. 相关分析法。该法与局部地下水资源评价的相关分析法基本相同，不同的是所取资料应当是区域平均的。

f. 大面积群井抽水法。通过大面积长时间段的群井抽水，以面平均的稳定流量或开采模数为依据，进行地下水资源评价。

另外还有电模拟法，主要是网络模拟法等。

（2）按评价方法依据的理论分类

① 成因分析法　根据地下水的实测资料，找出地下水各要素与各影响因素间的关系及其时空变化规律，探索地下水动态发展趋势，以此评价地下水资源。目前应用比较广泛的是水量平衡法、地下水动态法及水文法。

② 数理统计法　把地下水的现象视为随机事件，以概率论与数理统计为工具，求得其统计规律。目前应用较多的是相关分析法。

③ 地下水运动学法　以地下水运动学的理论评价水资源，目前应用较多的是非稳定流理论，而稳定流理论也有应用。

（3）按地下水资源评价手段分类

① 分析计算法　根据实际资料，应用各种途径直接分析计算。

② 实验法　实验法主要是指模拟实验法。地下水资源评价中一般用网络模拟，如电阻网络模拟和阻容网络模拟。

以上三种分类方法各有优缺点。第一种分类方法的缺点很明显，它把开采区分成局部和区域开采，比较含糊，因为开采区面积与开采强度的大小并无严格界限。同时多数方法是可以通用的，也就是说，有些方法既可用于局部地下水资源评价，又可用于区域地下水资源评价。这种分类方法的优点是直观，因此是生产上常用的一种方法。第二种分类方法是根据评价方法依据的理论分类，因此是一种可行的方法；它可以比较好地把各种评价方法归并在有关类型中。这种分类方法对于生产应用、科学研究、分类方法的研究都有较大的意义，缺点是对于那些以两种理论为依据的方法难以归类，例如漏斗均衡法等；第三种分类法是从形式上的一种分法，有一目了然的特点。

8.2.2.2　地下水资源评价的主要任务与内容

（1）地下水资源评价的主要任务

人类开发利用地下水绝非一时之计，乃是长远的任务，这应当成为开发利用地下水的指导思想。因此在讨论与地下水开发利用的有关问题时（其中包括地下水资源评价的主要任务），都应当由此出发加以考查。

地下水资源评价的主要任务与地下水资源评价的依据分不开。大家知道，地下水资源评价的主要任务的提出，经历了以下的发展过程。

① 以确定“四大储量”作为地下水资源评价的主要任务　由于四大储量自身存在的问题，所以四大储量作为地下水资源评价的依据和内容满足不了生产的要求，往往是为计算而计算，算了以后也心中无数，如果以此作为开采的依据，往往是盲目地开采。

② 以确定“可以开发利用的地下水量”为主要任务　可以开发利用的地下水量是指在开发利用条件下，区域内可以得到的地下水量，它既取决于开采条件（如取水方式、开采强度、取水建筑物的结构和布局、提水设备的能力等），也取决于开采区内的水文地质条件、区域内的垂直补给和边界以外的侧向补给、含水层的输

水能力、越流补给及弹性释水等。对此有如下的认识。a. 地下水资源是客观存在的，地下水资源评价的主要任务应当是确定有多少的地下水可供开发，显然可供开发利用的地下水量不应当取决于开采条件，也就是说，客观存在的地下水资源与性质不同的人为因素（开采条件）联系在一起是不恰当的。至于选择何种开采条件，则是另一回事。b. 考虑到开发利用地下水的指导思想，在当前或一定时间内，由于开采量还不大，越流补给、弹性释水和区域外的侧向补给是存在的，因此研究它们是必要的。但是从长远的观点看问题，有必要对这些补给加以考查。随着打井技术和提水设备的发展，以及工业、农业、生活用水的增加，越流补给将发生变化，就难以依靠。另外，事实已经证明，含水层弹性释水后就很难再恢复，弹性释水的水量随着开采时间的加长将愈来愈少。至于侧向补给，尤其是在区域开采条件下，这里开采，那里也开采，这里水位下降，那里水位也下降，即使由于开采量的不同所引起的水位下降的不同，形成一定水力坡度造成的水平运动量也是有限的，更何况这个水平运动量是可正可负的，因此，在局部开采时，侧向补给是不能忽视的。

③ 以确定地下水允许开采量作为主要任务　地下水允许开采量的概念极不统一，如果把它理解成为开采以后总能补回来的水量，笔者认为在无损失条件下，它是可能最大补给量；如果有损失则应是可利用量。

综上所述，目前在地下水资源评价中，四大储量已基本上不用了，而可以开发利用的地下水量较四大储量有优越之处，在生产上起了一定的作用，是生产上常用的一种。但是，它还存在一些问题。因此，近年来以确定地下水允许开采量为主要任务被人们愈来愈重视了。

（2）地下水资源评价的主要内容

地下水资源评价的主要内容与主要任务密切有关。同时，地下水资源评价主要内容的提出也经历了一个发展过程，可以说到目前为止看法尚未完全一致，大体有以下几种提法。

① 以确定四大储量为主要任务时地下水资源评价　这种评价的内容是研究开采储量与用水量之间的关系，或研究天然资源（指地下水补给与消耗的长期对立发展过程中，在现代含水层中形成的天然补给量）与用水量之间的关系，并确定用水的保证度，进而提出各种解决措施，以满足用水要求。

② 以确定可以开发利用的地下水量为主要任务时地下水资源评价　评价的主要内容是确定一定开采量和开采方式下地下水位的变化趋势。显然，对于以下不同类型的地下水，其评价内容是有区别的。

a. 潜在水资源评价的主要内容。它是按照规定的开采水平（即根据用水要求定出的逐年开采量）及地下水补给情况，计算地下水位逐年变化情况，当地下水埋深不超过提水设备所允许的降深时，则根据允许降深下的开采量和各年的灌溉用水量确定灌溉用水的保证度。当保证率过低时，则应分析人工补给的可能性及补给量

的大小或论证应用替代水源的可能性及措施。

b. 承压水资源评价的内容。承压水资源评价的主要内容，应根据所研究的承压水的具体情况而定。

当所研究的承压水不能接受当地大气降水补给，而且远离补给区，侧向补给很少时，其主要补给来源是相邻含水层的越流补给。在大面积开采条件下，往往开采量大于补给量，常常需要动用一部分弹性储量，这样引起地下水位的持续下降。在这种情况下，一般应在规定的时间被给定一个允许降深或根据现有提水设备确定地区的可利用量，并分析人工补给的可能性，推算需要的人工补给量；或根据现有（包括近期）的回灌能力，确定地下水的可利用量；或根据要求的开采量，预测规定时间内的地下水位降，并按照下降后的地下水埋深，选择提水设备或校核现有提水设备是否满足提水要求，并提出相应的解决措施。

当研究的承压水虽然不能接受当地（指承压区）的降雨补给，但是它能接受开采区以外的降雨补给。应当指出，降雨补给量的大小，不仅与当年的降雨量有关，而且往往与前几年的降雨量有关。

③ 以确定允许开采量为主要任务时的地下水资源评价　评价的主要内容系根据逐年的允许开采量（用计算的方法获得）及实际用水量，进行年或多年调节计算，确定其灌区保证程度。当灌溉保证率过低时，应提出相应的解决措施。如人工回灌或引用外水等。即对各种水体进行统一调度，以满足用水的需要。

8.3　地下水源的开发规划

8.3.1　规划原则

在资源型缺水的地区，许多城市供水和农业灌溉用水都依靠地下水。由于对地下水资源的认识不足，许多人认为它是“取之不尽，用之不竭”的。其结果是缺少规划，盲目布井，过量开采，造成地下水位持续下降、水质恶化和地面沉降等诸多环境地质问题。为避免上述问题的发生，在编制地下水开发利用规划时，必须坚持贯彻全面规划、协调发展、可持续利用、因地制宜、依法治水、科学治水的规划原则。具体列入以下几项基本原则。

① 地下水开发利用规划应以地下水总体规划及国土整治规划为基础，并兼顾流域与行政区域之间的关系，统筹规划区内国民经济近期和远景发展的需要，对水资源的开发、利用、保护和管理做出总体安排。

② 规划应本着统筹协调生活、生产和生态环境用水，充分利用当地地表水、合理开采地下水，兼顾区内旱、涝、碱的综合治理，并合理地进行井、渠、路、林、电的规划布置。

③ 根据规划区的水资源状况和经济社会发展条件，确定合适本地区的水资源

开发利用与保护模式及对策，提出各类水的优先开发顺序。在确定开发利用地下水时，应优先开采浅层地下水，严格控制开采深层地下水，尤其是在长期超采引起地下水位持续下降的地区，应限量开采；对已造成严重不良后果的地区，应停止开采。在滨海地区、湖滨地区、绿洲与沙漠过渡带地区，应严格禁止开采，以防海水入侵、湖泊干涸及植被枯死导致沙漠化等。

④ 应坚持水量与水质并重，开采与补给平衡，按照国家颁布的有关与水资源管理的法律、法规和政策，以及相应的技术规范进行规划编制。

⑤ 要运用水资源系统的理论与方法，合理配置地表水和地下水资源，缓解面临的水资源紧缺问题；采用先进的技术方法与手段，编制出高水平的地下水开发利用规划。

⑥ 重视水质、保护供水安全。地下水质评价标准应按其功能确定，一般可以参照《生活饮用水卫生标准》（GB 5749—2006）、《地下水质量标准》（GB/T 14848—93）和《农田灌溉水质标准》（GB 5084—92）执行。

⑦ 规划中应制定地下水动态监测规划，借以指导地下水的合理开发利用。地下水监测站网的布设，可参照《地下水监测规范》（SL/T 183—96）进行。

从上述规划基本原则看，地下水开发利用规划涉及面广，涉及学科比较多，是一个综合性很强的规划。也就是说，某些问题考虑不周或疏漏就会造成顾此失彼，成为一个不完善且难以实现的规划。为此，地下水开发利用规划可参考《全国水资源综合规划技术大纲》和《全国水资源综合规划技术细则》（试行）（水利部水利水电规划设计总院，2002 年 8 月）进行，应符合《机井技术规范》（SL 256—2000）的有关要求。

8.3.2 规划分区

为便于规划，结合自然环境条件和基本资料，根据上述规划原则和规划任务，特做以下规划分区。

① 根据流域地形地貌单元，将地下水规划划分为一级类型区，即山丘区、平原区、沙漠荒漠区或湖滨、滨海区。山丘区是水资源的产流区或形成区；平原区是水资源的利用区，也称用水区；沙漠荒漠区或湖滨、滨海区为水资源的容泄区。

② 水资源评价与开发利用应按河流水系的地域分布进行，故将流域平原划分为二级类型区。

③ 根据流域平原区的水文地质单元，又划分出三级类型区，或便于规划使用，结合行政区划可划分为三级类型区。

④ 根据地下水赋存条件，地质环境和生态环境。从地下水资源保护角度出发，可将地下水开发利用区划分为控制开采区、适宜开采区、调控开采区、禁止开采区四种类型。控制开采区指地表水散失区、地下水形成区；适宜开采区是指地下水溢出带附近及补给条件好的平原区；调控开采区是指冲积-冲洪积平原中下部，地下

水位较高，土壤盐渍化比较严重的地区；禁止开采区是指绿洲与沙漠间的生态环境脆弱带或绿洲与滨海、滨海间的地质环境脆弱带。

8.4　小型地下水源利用工程

8.4.1　泉水的利用工程

泉是地下水的天然露头。地下水只要在地形、地质、水文地质条件适当的地方，都可以泉的方式涌出地表。因此，泉水常常是地下水的重要排泄方式之一。

（1）泉的形成

泉的形成主要是由于地形受到侵蚀，使含水层暴露于地表；其次是由于地下水运动过程中岩石透水性变弱或受到局部隔水层阻挡，使地下水位抬高溢出地表，如果承压含水层被断层切割，且断层又导水，则地下水也能沿断层上升到地表形成泉。

泉一般在山区及山前地区出露较多，尤其是在山区的沟谷底部和山坡脚下。由于这些地方受侵蚀强烈，岩石多次受褶皱、断裂、侵入作用，形成了有利于地下水向地表排泄的通道，因而山区常有泉水。平原区一般都堆积了较厚的第四纪松散岩层，地形切割微弱，地下水很少有条件直接排向地表，所以泉很少见。

（2）泉的分类

① 按其补给来源分类

a. 上层滞水泉。此类泉水靠上层滞水排泄补给。泉水流量变化大，枯水季节水量很小，甚至枯干。水质往往不好，一般不能作为供水水源。

b. 潜水泉。此类泉由潜水排泄补给，也叫下降泉，如图 8-7(a)～(d)。潜水泉的水量较上层滞水泉稳定，水质一般较好，但季节性变化仍是明显。

c. 承压水泉　此类泉水由承压水排泄形成。其出露特点是泉水向上涌出，因

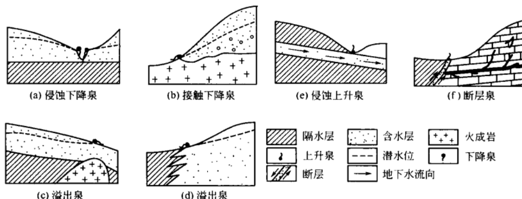


图 8-7　泉的形成条件

此也叫上升泉或自流泉，如图 8-7(e)、(f) 所示。这种泉较为稳定，水质也好，若有足够大的水量，则是理想的供水水源。

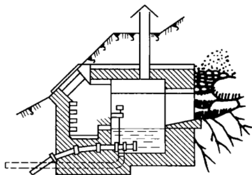
② 根据出露原因分类

a. 侵蚀泉。当河流、冲沟切割到潜水含水层时，潜水即排出地表形成泉水，这种泉与侵蚀作用有关，因此称为侵蚀下降泉，如图 8-7(a) 所示。若承压含水层顶板被切割穿，承压水便喷涌成泉，则称为侵蚀上升泉，如图 8-7(e) 所示。

b. 接触泉。地形被切割到含水层下面的隔水层，地下水被迫自两者接触处涌出地表，此类泉称为接触下降泉，如图 8-7(b) 所示。在岩脉或侵入体与围岩接触处，因冷凝收缩而产生裂隙，地下水便沿裂隙涌出地表成泉，则可称接触上升泉。

c. 溢出泉。岩石透水性变弱、隔水层隆起以及阻水断层所隔等因素使潜水流动受阻而涌出地表形成泉，此类泉称溢出泉或回水泉，如图 8-7 (c)、(d) 所示。在此类泉的出露口附近地下水表现为上升运动，如不仔细分析地质条件，很容易将它误认为是上升泉。

d. 断层泉：承压含水层被导水的断层切割时，地下水便沿断层上升，流出地表成为泉，此类泉称为断层泉，如图 8-7 (f) 所示。断层泉常沿断层线成串分布。


图 8-8 泉室引泉工程

根据泉水出露特点，予以扩充、收集、调节与保护的引泉水建筑物，通称引泉工程，如图 8-8 所示。引泉工程必须在具有特殊的地下水天然露头条件下采用。

8.4.2 井的设计、施工

8.4.2.1 管井

(1) 管井的设计

① 管井的基本结构

因水文地质条件、施工方法、配套水泵和用途等的不同，管井的结构形式也多种多样。一般结构，可分为井口、井身、进水部分和沉砂管四部分。

② 井管类型

井管按其结构用途来分，可以分为不进水的井壁管和用以进水的滤水管两种。这里只阐述井壁管的类型、规格及适用条件等。滤水管的有关内容将在后面专门叙述。

井管的种类很多，一些发达的国家采用各种渗炭钢管、涂料普通钢管、不锈钢

管、铜管、铝管、塑料管和玻璃钢管等。我国的非农用管井多用铸铁管和钢管，农用管井除铸铁管、钢管之外，多采用混凝土管、钢筋混凝土管、石棉水泥管和其他非金属管材，近年来塑料管等新型管材的应用也非常普遍。

井管按材料性质可分为金属井管和非金属井管两大类。

金属井管有无缝钢管、焊接钢管和铸铁管等，非金属井管则主要包括石棉水泥管、混凝土管、钢筋混凝土管和塑料井管。

③ 井管的连接

出厂的井管都是短管，因管材不同，长度为 1～4m 不等。在下管时需要将每节短管严密牢固地连接在一起，不允许产生错口、弯折、漏洞等现象。否则，会造成管井涌砂、漏砾、污水（或咸水）侵入，以及管外填砾不匀，水泵难以下入井管内等现象，轻者管井不能正常使用，重者报废。

井管连接方式多种多样，因管材不同而异，分为管箍丝扣连接焊接粘接三种方法。

④ 滤水管

滤水管的基本要求：滤水管是安装在不稳定的含水层段，如砂层、裂隙岩层等。滤水管应该是能让含水层中的水通畅地流入井中，同时又要阻止砂或破碎的岩块随水进入。滤水管对井壁不稳定的井还要起到加固作用。因此，理想的滤水管应满足以下要求。

a. 在阻力最小且流速不超过极限值（不扰动含水层）的前提下，保证最大的进水量；

b. 具有足够的机械强度，能承受地层压力；

c. 有较高的抗腐蚀能力，保证水井有较长的使用期限；

d. 可以有效地防止涌砂，同时又不易发生机械堵塞；

e. 结构简单、制作方便、安装迅速、成本低廉。

当前，国内外对滤水管进行了大量研究工作，针对地层情况，设计出了适应各种条件、各种材料的滤水管。下面将就常见的滤水管加以讨论。

滤水管的类型：滤水管的类型是多种多样的，区分方法主要是根据滤水管的结构特征、材料和滤水孔的形状等。按结构特征可分为四种基本类型：骨架滤水管、缠丝滤水管、包网滤水管和砾石滤水管。

滤水管的选择：选择滤水管类型主要是依据含水层的岩层结构和岩性特征。根据含水层特征正确地选择滤水管，可以增大单井出水量，避免涌砂和延长水井寿命。表 8-2 为我国常用的滤水管类型选择表。

(2) 管井的施工

管井施工必须遵循“先设计、后施工”的原则，按照有关规范和技术要求严格进行。现将其主要施工程序和成井工艺简述如下。

表 8-2 不同含水层适用的滤水管类型

含水层特征	滤水管类型
稳定的基岩含裂隙、岩溶地下水	不需要安装滤水管
不稳定的易坍塌、掉块的基岩破碎带及卵砾石、砂砾层、粗砂等地层	1. 圆孔、条缝式滤水管 2. 缠丝滤水管 3. 填砾
中砂 细砂	1. 缠丝滤水管、包网滤水管 2. 填砾 3. 贴砾滤水管
粉砂 含泥地层	1. 砾石滤水管，浅井填砾 2. 细砾贴砾滤水管

① 井孔钻进

井孔钻进开始前，必须进行管井施工设计。设计内容包括钻孔结构、钻进方法、操作规程、施工设备和材料等。并在此基础上，确定井位、备好凿井材料和完成其他准备工作，然后才能开始井孔钻进工作。

井孔钻进方法较多，因施工机械不同而异。有冲击钻进、回转钻进、冲击回转钻进以及反循环钻进、空气钻进等。在农用管井施工中，目前国内普遍使用的方法为钢丝绳冲击钻进和回转钻进，现分述如下。

a. 钢丝绳冲击钻进。钢丝绳冲击钻进是借助于一定重量的钻头，在一定的高度内周期地冲击井底，使岩石破碎而获得进尺。在每次冲击之后，钻头在钢丝绳带动下回转一定角度，从而使钻孔得到规整的圆形的断面。破碎的岩屑与水混合形成岩粉浆，当岩粉浆达到一定浓度后即停止冲击。利用掏砂筒将稠浆掏去，同时补充一些新鲜液体。由于钢丝绳冲击钻机都是装在汽车或拖车上，设备轻便搬迁方便，操作与管理简单，钻进成本低。因此它是农用管井施工中最常用的方法。它对于大砾石、漂石及脆性岩层特别有效。

b. 回转钻进。回转钻进的基本原理是使钻头在一定的压力作用下在孔底回转，以切削、研磨破碎孔底岩石，并依靠循环冲洗系统带走摩擦产生的热量和将岩屑带至地面。回转钻进依靠回转钻机来实现。我国施工农用水井常用的回转钻机有散装钻机、汽车装钻机和拖车装钻机三类。三类钻机只是机动性能不同，但结构没有本质区别，它的主要部件为传动装置、钻塔、转盘、卷扬机、泥浆泵等。

② 电法测井

简称电测井。其主要目的是判断井孔内含水层的位置和厚度，以防止盲目下井管，造成损失。故电测井已成为凿井工艺中不可缺少的一道主要工序。电测井的种类很多，目前最常用的是电阻率法测井。

③ 井管安装

简称下管，是成井工艺中的最重要工序，直接影响到成井的质量。在下管过程中如发生脱落、破裂、错位或扭斜事故，会造成很大的损失，甚至使水井报废。因

此，对下管必须采取慎重态度。常用的下管方法有提吊下管法和钻杆托盘下管法，简单介绍如下。

提吊下管法主要适用于安装抗拉强度较大的井管，如钢管、铸铁管、塑料井管等。该方法是用钻机的起重设备提吊井管，因此下管深度取决于井管的抗拉强度和钻塔的负荷能力。该方法具有下管速度快，施工比较安全，且易于保证井管下直等优点。

钻杆托盘下管法适用于非金属井管的下管，使用较为普遍。钻杆托盘下管法主要设备为托盘、钻杆、井架及起重设备。

④ 填砾

就是在对着含水层的滤水管周围人工围填砾料，从而在水井周围形成一个人工过滤层，达到增大水井出水量和防止涌砂的目的。下管结束后，应立即进行填砾。如拖延时间，则可能发生缩径、坍塌等故障，对成井质量产生影响。另外，如果填砾工作不符合要求，就有可能使水井出水量减少、涌砂，甚至报废。因此，必须重视此项工作。

8.4.2.2 大口井

大口井以其口径较大而得名。又因其深度不大，多集取浅层地下水，故又称浅井。大口径的直径大小主要根据地质岩性、井的深度、打井的机具及施工方法等确定。一般直径在3～5m，最大可达10m。井深主要根据地下水的埋深，含水层的导水性能、单井出水量大小以及施工条件决定。含水层导水性好，单井出水量大，人工开挖时井深可小些。反之，则大一些。大口井的深度一般在20m左右，超过50～60m者甚少。

大口井具有出水量大，施工简单、就地取材、检修容易、使用年限较长等优点。但井的出水量大小易受潜水位变化的影响。

（1）大口井的结构

大口井由三部分组成：

① 井台　井的地上部分，主要保护井，防止洪水、污水以及杂物进入井内，同时还要考虑安装提水机具等，井台高度一般高出地面0.5m以上；

② 井筒　进水部分以上的一段，又称旱筒；

③ 进水部分　相应含水层的部分，常因造井材料不同，其结构也不一样。

除上述三部分而外，当大口井为完整井时，进水部分以下还应设沉砂部分，深度一般依地层颗粒大小级配情况而定，约为1～3m。

大口井根据井材料的不同可分为石井、砖井、混凝土井以及钢筋混凝土井等多种类型。在农田灌溉中，目前最采用的是砖石或加筋砖石以及混凝土或钢筋混凝土井大口井。现将大口井的底盘、井筒及滤水结构分述如下。

① 底盘结构

大口井的底盘，一般都采用钢筋混凝土现场浇注，高度约为50～100cm。为了

减少下盘时的阻力，地盘外径比井筒外径大 10～20cm，并在下部做成刀刃形。刀刃与水平面的夹角约为 45°～60°。在含有大量卵石的地层中，为了防止刀刃破坏，应在刀脚下加一环型的角钢。

② 井筒的结构

大口井的井筒一般多为空心圆柱体，为了方便于沉降，也可做成上小下大的空心圆锥体，井筒的厚度常随造井材料的不同而异，对砖石井筒多为 24～40cm，一般水面以上部分的井筒厚度大小较水下部分小。

对直径较大的井筒，因其天然拱的作用很小，故在设计时不仅要考虑其轴向压力，同时还应考虑其周围土壤的侧压力，具体计算方法请参阅相关技术手册。

在校核计算后，当径向或切向的最大应力只要一个超出井筒的允许抗压强度时，便可增加井筒的厚度或增设必要的应力钢筋。

③ 滤水结构

a. 井底进水的滤水的结构。井底滤水结构也称反滤层，是防止井底涌砂的安全措施，一般可设 3～4 层，每层厚度一般为 20～30cm，总厚度约为 0.7～1.0m，当含水层为粉细砂时，则可设 4～5 层，总厚度可达 1.0～1.2m。当含水层为粗砂、砾石时，可只设 2 层，总厚度不超过 0.6m。相邻滤料之间的粒径比值，一般是上一层是下一层的 3～5 倍。

b. 井壁进水的滤水结构。井壁进水的滤池结构有多孔混凝土滤水结构和重水滤水结构两种类型。多孔混凝土滤水结构可制成块状，与混凝土块或砖块相间砌筑，也可在现场浇注成带状或预制成井筒。

（2）大口井的出水量计算

大口井的出水量计算公式较多，此处不便列出，请查阅水文地质手册。

（3）大口井的施工方法

大口井的施工方法可分为人工开挖法和机械施工法，现分别叙述如下。

① 人工开挖法　人工开挖法是用人力和简单的半机械化工具与设备来开挖大口井的一种施工方法。该法称为沉盘法或沉井法。具体方法是把预制好的底盘放在井位上，底盘上砌筑井管至适当高度，然后掏挖支承底盘的土层，底盘即与井管一起下沉，至适当深度时再继续砌筑井管，接着继续开挖，如此反复，直至下沉到设计深度为止。

沉盘法可有平地下盘与井中下盘之分。当地下水埋深较大、岩层又较稳定时，为了加快施工速度，可先不放盘开挖井筒，至离地下水位 1.5～2.0m 时再放盘开挖，这种方法称井中下盘。而把在地面上放盘开挖称为平地下盘。

② 机械施工大口井的方法　机械施工大口井的方法具有节省劳力、提高工效、施工安全并容易解决水下施工问题等优点。常用的机械施工方法可分为挖掘机械开挖法、水力机械开挖法等。

a. 挖掘机械开挖法。挖掘机械开挖法适用于松散岩层，通常在砂土层岩内可

使用两瓣式挖掘机进行施工，而在砾石或卵石地层中则可使用四瓣式挖掘机进行施工。采用合瓣式挖掘机开挖大口井，仅适用于井径较大、井深较浅的大口井，而井径较小。井深较大的大口井则不宜采用。

b. 水力机械开挖法。水力机械开挖大口井的施工方法适用于细粒松散和黏性不大的岩层。其原理是利用高压水流经水力喷射器的喷嘴来冲击井底岩层，使其松散后与水混合，并用专门的管子借负压力作用将其喷出井口以外。这种施工方法尽管效能很高，但需具有足够的水源供应，且要有水泵及专门水管等设备保证，方可采用。

8.4.2.3　辐射井

辐射井，是随着地下水集取工程发展而出现的一种新井型。它能高效集取不同类型水文地质条件的地下水，特别在浅层、薄层含水层，以及透性差的深厚含水层中，其出水量较普通管井、筒井及大口井高出数至十倍。具有很强的取水能力和较高的经济效益。

（1）辐射井的结构

辐射井是由大口径的集水竖井和若干水平集水管（孔）联合构成的一种井型。其水平集水管在大口竖井的下部穿过井壁深入含水层中，由于水平集水管成辐射状分布，故称为辐射井。

① 集水井　又称竖井。集水井外形相似于大口井，但它一般不直接从含水层进水。因此，除少数井底进水者外，绝大多数集水井的井底、井壁是封死的，以利于施工和管理。用途是：汇集由辐射管进来的地下水，造成方便的提水条件；辐射孔（管）施工的现场；提水机具安装的场所。集水井的直径大小主要取决于施工辐射孔（管）的需要，当前施工机械多为水平钻机和千斤顶，要求场地尺寸为 2.1～2.5m。但工程上多采用 3.0m，也有直径达 6m 者。

集水井的深度视含水层的埋藏条件而定。多数深度在 10～20m 之间，也有深达 30m 者。根据黄土区辐射井的经验，为增大进水水头，施工条件允许时，可尽量增大井深，要求深入含水层深度不小于 15～20m。集水井用混凝土和钢筋混凝土井管。农用辐射井的集水井多用青砖砌筑。

② 辐射孔（管）　松散含水层中的辐射孔中一般均穿入滤水管，而对坚固的裂隙岩层，可只打射孔而不加设辐射管。辐射孔上的进水孔眼参照前述滤水管进行设计。辐射管的材料多为直径为 50～200mm 的穿孔钢管，也有用竹管和塑料等管材的。管材直径大小与施工方法有密切关系。当采用打入法时，管径宜小些；若为钻孔穿管法，管径可大一些。辐射管的长度，视含水层的富水性和施工条件而定。当含水层富水性差、施工容易时，辐射管宜长一些；反之，则短一些。目前生产中，在砂砾卵石层中多为 10～20m；在黄土类土层中多为 100～200m。

辐射管布置的形式和数量多少，直接关系到辐射井出水量的多少与工程高价的高低，应密切结合当地水文地质条件与地面水体的分布以及它们之间的联系，因地

制宜地加以确定。

（2）辐射井的适用条件

① 在地下水浅埋薄层含水层，含水层在 10m 以内，采用其他井型无法保证出水量；

② 含水层透水性较差，且厚度在 20m 以上，特别在弱透水性的黄土塬和黏土裂隙含水层地区，开发农田灌溉用水时，或为防止土壤盐碱化、沼泽化以降低地下水位时；

③ 傍河、湖区成井，由于辐射管可从地表水体底部的含水层中截取水量，效果甚佳；

④ 裂隙及溶隙发育而透水性和含水性不均一的含水层以及当地下水埋深不大时；

⑤ 对于大型基础工程排水或含有地下水的高边坡地区、尾矿坝为利于边坡稳定需要降低地下水时。

（3）辐射井的分类及其平面布置形式

按含水层类型分：潜水含水层及承压含水层的辐射井。按结构分为井壁侧滤孔及水平辐射滤管的辐射井。按配置排数分为单层辐射管式及多层辐射管式的辐射井，当含水层薄但富水性较好时，可布设单层辐射管，当含水层富水性差但厚度大时，可布置多层辐射管。按平面布置的不同集水形式分：①集取河床渗透水时，集水井设在岸边或滩地，辐射管伸入河床下；②集取河床渗透水和岸边地下水时，集水井设在岸边，部分辐射管伸入河床下，部分辐射管设在岸边；③集取岸边地下水时，集水井和辐射管均设在岸边；④远离河流集取岸边地下水时，大多数辐射管的布置垂直于地下水流向；⑤集取黄土中地下水时，集水井和辐射井管均设在黄土含水层中，一般较均匀布置辐射管。

（4）辐射井出水量计算

由于辐射井的结构特殊，抽水时水力条件与管井、大口井不同。试验表明，辐射井抽水时水位降落曲线由两部分组成，在辐射管以外呈上凸状（类似普通井），在辐射管范围内呈下凹状。水流运动的方向也不同，辐射管以外，地下水呈水平渗流，辐射管范围内以垂直渗流为主。因受辐射管的影响，距井中心等半径处，地下水位高低不同，辐射管顶上水位较低，两辐射管之间的水位较高，呈波状起伏。

目前，辐射井出水量的确定尚无较准的理论计算方法，多按抽水试验的资料确定。

（5）辐射井的施工

辐射井的集水井和辐射孔（管）的结构不同，施工方法和施工机械也完全不同，故分别叙述如下。

① 集水井的施工方法　与前述大口井的施工方法基本一样，不再赘述。

② 辐射管的施工方法　辐射管的施工方法基本上可分为顶（打）进法和钻进

法两种。前者适用于松散含水层，而后者适用于黄土类含水层。

8.4.3 地下水截流工程

8.4.3.1 截潜流工程的类型

按截潜流的完整程度分为两种类型。

① 完整式　即将河床中的地下径流完全拦截，如图 8-9 所示。这种形式适用于砾卵石含水层厚度不大的河床中。

② 非完整式　当河床中含水层厚度较大或水量较充足时，考虑经济因素，在满足用水需要的前提下，也可不将地下径流完全拦截。非完整式截潜流工程又按集水方式分为明沟式、暗管式和盲沟式三种类型。

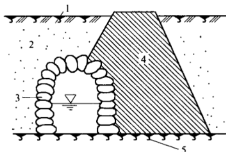


图 8-9　完整式截潜流工程

1—河床；2—含水层；3—集水廊道；4—截水墙；5—不透水层

8.4.3.2 截潜流工程的结构

通常由五部分组成（图 8-10）。

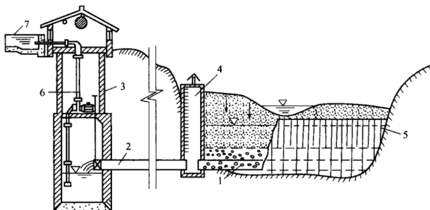


图 8-10　截潜流工程结构

1—进水部分；2—输水部分；3—集水井；4—检查井；5—截水墙；6—水泵；7—出水池

① 进水部分　主要作用是集取地下潜流，多由用当地材料（砖、石等）砌筑的廊道或管道构成。进水部分留有进水孔眼，周围填充滤料。

② 输水部分　将进水部分汇集的水输送往明渠或集水井，以便自流引水或集中抽水。输水管道一般为不进水设计，铺设有一定的坡度。

③ 集水井　用于储存输送来的地下水，通过提水机具，将地下水提到地面上来。若地形条件允许自流时可不设集水井，直接用管道或明渠引水或建蓄水池，利

用闸门调节水量。

④ 检查井　输水建筑的端部、转角和断面变换处应设置检查井。直线部分检查井的间距，一般可采用50m。设置检查井的目的，是为了通风、疏通、清淤、修理及观察管道工作状况等。当输水部分不长（<100m）时，为了防止洪水淹没，在河床中可不设检查井，而只在岸边输水部分与进水部分衔接处设置。

⑤ 截水墙　是截潜流工程的主体部分，为一拦河修筑的不透水墙，也称地下坝或暗坝。多用当地材料（黏土、砌石等）修建或用混凝土浇铸而成。

8.4.3.3　截潜流工程设计要点

（1）位置的选择

截潜流工程地点的选择，关键是确定截水墙的位置。它关系到工程造价和取水工程的正常运行。工程地点的选择应考虑几下几方面。

① 水量、水质要求　截潜流河段应有满足需要的地下径流量，且水质符合要求；

② 地形要求　为节约成本，最好是选择在相对狭窄的河段，但也要考虑输水和用水的方便。

③ 含水层条件　控制土方量、降低造价，含水层厚度不宜过大，以3～5m为宜。

④ 建筑材料　应有就地取材的条件，如石料、黏性土等。

（2）工程平面布置

出于节约建筑材料和降低造价的目的，截水墙一般与河道的主流线方向垂直。为便于管理和检修，多将集水井、泵站和输水管线设置在河道的一侧，而另一侧一般不设任何工程建筑。

8.4.3.4　截潜流工程施工

（1）管道施工

管道施工应注意以下几点。

① 管沟的开挖断面要考虑截渗墙和管道的设计尺寸，并要便于施工安装。

② 管沟开挖要注意河床堆积物的稳定性，必要时应进行支护加固，以防坑壁坍塌。

③ 防洪。如工程量大，短期内难以完成，则要考虑防洪措施，确保安全施工。

④ 施工排水。开挖前要进行排水量校核计算，排水设备的能力必须满足排水要求，且要有备用排水设备。

（2）进（输）水廊道施工

廊道式截潜工程的施工方法大致可分为两种。如潜水位较高时，多采用开挖明沟法；如潜水位埋深较大，开挖深度较深时，宜采用开挖地道法。施工中应特别注意开挖地层的稳定性，除特殊情况外，一般应护衬加固，防止坍塌，同时，也要考虑施工排水问题。

8.4.4 小型地下水库

地下水库是指以岩石空隙为储水空间、在人工干预作用下形成的具有一定调蓄能力的水资源开发利用的水利工程。

8.4.4.1 地下水库的特点

地下水库是对“三水”（大气降水、地面水、地下水）资源在时间和空间上进行联合调蓄运用，以达到最大限度地充分利用水资源的一项综合水利工程。

（1）优点

① 蒸发损失小，提高了蓄水的有效利用率　地下水库的水面蒸发损失极小，当库水位超出允许水位的较短时间里，虽然也有蒸发产生，但其数量比起地表水库的水面蒸发要小得多，因而，地下水库的蓄水效益明显高于地表水库。

② 不占土地资源、不动迁、不筑高坝、投资少　地下水库储水于地下含水层，不需要在地面上修建水库工程，除了兴建一些人工补给工程占用少量土地外，基本不占地、不存在淹没问题。而地表水库则通常需要占用大量耕地或荒地，同时还要解决复杂的移民问题。地表水库相比，地下水库施工简单，投资少，管理方便。

③ 基本没有淹没、崩溃问题，淤积问题较少、安全性高　地下水库由于采用地下储水，因此除岩溶地下水库以外，孔隙地下水库基本上无淹没问题。有坝地下水库的地下坝主要作用是形成一个阻水体，地下水库对地下坝体的强度、渗透性均无严格要求，即使地下坝被破坏，也不会造成像地表水库垮坝的灾害，从战备观点来看，地下水库更安全。地下水库只要不用浑浊的洪水直接回灌，就不会出现严重的淤积和堵塞含水层的问题。相对地表水库而言，建设地下水库的安全性较高。

④ 水质良好，不易污染　由于地下水库的蓄水和取水都是利用含水层，补给要通过包气带，因此能够对地表水起到过滤和净化水质的作用。

⑤ 多年调节　利用地下含水层蓄水，蒸发量损失小、地下径流缓慢，容易做到水资源的多年调节。

（2）缺点

蓄水区污染后难以治理；水资源开发成本较高；水量调节过程缓慢，对于洪水的调控作用较差；蓄水位控制不当，空隙地下水库可能引起库区的土壤次生盐碱化和沼泽化问题，而岩溶地下水库则可能产生地表淹没问题；功能较为单一。

8.4.4.2 地下水库的基本结构及功能

（1）地下水库的系统结构

地下水库的建设是一项复杂的系统工程，一般情况下，一个完整的地下水库系统有六个子系统组成，即补给水源子系统、补给区子系统、储存子系统、排水子系统、检测子系统、管理运行子系统，每个子系统又由若干部分组成。

（2）各子系统的功能

① 补给水源子系统　补给水源子系统的功能是为地下水库提供合乎要求的水

源，它是地下水库建设的前提，如同地表水库一样，即使具有来水水源，仍不能称其为“水库”。

② 补给区子系统　该子系统主要是如何将补给水源子系统的供水渗入补给到地下含水层中。由于入渗速度较慢，一般情况下，补给区子系统建设的关键问题是如何大幅度提高地层的入渗能力和含水层的快速接纳能力。

③ 储存子系统　该子系统的功能主要有两个方面，一是将补给水储存，二是使补给水到达用户需要的最有利的开采位置。

④ 排水子系统　排水子系统的功能主要有：将地表补给水源不合乎水质要求的来水排出区外；将多余的地表来水排到区外；将库区不合乎水质要求的地下水（例如咸水）排出，并输送到区外；将符合用户要求的地下水抽出并供给用户；地下水位超过要求时，进行排水调节。

⑤ 检测子系统　主要功能：监测补给水源的水质、水量；监测库区及相关区域地下水的水位、水质变化；监测排出的地下水水质、水量。

⑥ 管理运行子系统　主要是根据监测子系统提供的情报以及用水户的要求，进行地下水库各子系统的管理和调度。

8.5　地下水资源保护

地下水是宝贵的水资源，地下水的保护对于保障人民群众身体安全，促进社会经济健康和谐发展具有重要的意义。长期以来，由于我国社会经济的快速发展，对地下水重开发轻保护，加上由于对地表水和地下水之间的关系以及地下水的资源、生态与环境支撑作用等认识不足，产生了水质污染、水量枯竭、生态退化等问题，严重地制约了社会经济的健康发展。

地下水资源的保护目标不仅包括水质，使其不受人类社会经济活动的污染，还要保护水量的可持续利用。地下水资源具有多年调节能力，是重要的储备性资源，在日常开发利用的同时，更要兼顾对资源的战略储备，提高抵御极端事件的冲击，维持社会经济的健康稳定发展。因此，地下水水量的保护不仅包括日常开采要控制在可开采量之下，还要预留出应对极端事件的储备量。另外，地下水资源与生态系统也具有密切的关系，在地下水资源开发利用过程中，要兼顾对生态系统的保护。

水资源可持续利用是经济社会全面协调可持续发展的基础支撑条件。根据我国地下水资源的特点、面临的形势和开发利用中存在的问题，新时期的地下水资源保护应把提高地下水资源保障能力、改善人民群众的饮水质量和生存环境质量、保护生态、减轻或避免地下水不合理利用产生的地质灾害等放在重要位置，实现从重开发、轻保护到保护与开发利用并重的战略转变，加强水源保护，减少人为水灾，促进人水和谐。

8.5.1 地下水超采区治理

地下水超采区指某一时期地下水开采量超过了其可开采量，造成地下水水位持续下降并诱发生态环境问题或资源枯竭的区域。

2003 年颁布的《地下水超采区评价导则》（SL 286—2003）给出了超采区的判定标准。

8.5.1.1 地下水超采区治理方案

地下水超采区产生的根本原因是地下水的开采量大于地下水的可开采量，造成地下水的静储量不断减少，水位持续下降，并诱发了生态环境等问题。因此，治理地下水超采区的主要措施是减少地下水的开采量，使其逐步恢复到可开采量以内。这类措施属于节流措施。另外还有开源类措施，即通过地下水的人工回灌，增加地下水的补给量，提高地下水的可开采量。

地下水超采的原因是地下水开采量大于地下水的多年平均可开采量，但产生这个原因的背后是社会经济用水和可供水量之间的不平衡，即社会经济需水量大于可供水量，缺口部分就依靠超采地下水来实现平衡。因此，控制地下水开采量不是简单封闭开采井就能够解决的问题，而涉及当地不同水资源之间以及不同用户之间的水资源科学配置和合理利用。一些地区由于工程条件、水质问题和水价等经济因素的影响，存在着地表水利用（包括外调水）利用不足，而地下水过量开采的问题。因此，地下水开采量的控制要从工程和管理两方面进行措施的制定。

地下水超采治理一般遵循如下几个步骤。

① 工作范围核定　根据地下水超采范围，合理核定工作范围。

② 地下水开发利用现状调查　调查地下水开发利用的主要部门、开采井的地区分布和数量、超采地下水引发的生态环境问题等；整理、核算地下水补给量、地下水资源、地下水开采量和可开采量；分析超采的主要原因和地下水管理面临的主要问题，为压采方案的制定提供依据和基础。

③ 制定不同阶段治理目标　根据超采区地下水开发利用现状评价结果，制定不同阶段地下水压采目标。

④ 替代水源分析　根据有关成果，分析可作为地下水压采替代水源的水量，分析不同阶段当地地表水开发利用量及其他水源开发利用量中可作为地下水压采替代水源的水量，有条件的地区结合已有规划成果，通过供需分析来确定地下水压采的替代水量。

⑤ 确定地下水压采量　根据替代水源水量或供需分析结果，结合地下水超采区现状评价和工程配套措施情况，确定不同阶段地下水压采量。

⑥ 落实压采措施　根据地下水压采目标、压采量和已有的工程情况，地下水管理现状，提出压采实施的工程和非工程措施。地下水压采的配套工程列入当地有关的规划体系。

⑦ 建立方案实施的保障体系　地下水压采涉及很多部门，从管理、监测等方面提出系统的方案实施保障措施。

8.5.1.2　地下水超采治理工程措施

地下水开采控制的工程措施主要是替代水源的工程建设，即让地下水用户改用地表水，压缩地下水的开采量，从而实现地下水的超采治理。主要的工程措施有如下一些。

① 跨流域调水及配套工程　考虑超采区地下水压采，结合已有（或新建）的跨流域调水工程，制定配套的工程建设方案。通过跨流域调水量的替换，压缩当地的地下水开采量。由于很多地区地下水超采的主要原因是当地地表水短缺，因此，跨流域调水工程在很多地方是解决地下水超采问题的重要途径，例如我国华北地区。

② 本地地表水开发利用工程　在地表水开发潜力较大的地区，应优先开发利用当地的地表水资源，减少地下水资源的过度开采，适度增加地表水拦蓄能力和雨洪资源的利用能力。

③ 污水处理回用工程　根据超采区和城市的空间分布以及不同时期的污水处理规划，研究提出作为地下水压采替代水源的污水处理回用量及回用工程建设方案，并将其纳入当地污水处理工程规划。由于跨流域调水工程一般水价较高，只能重点供应给城市和工业等支付能力较高的用水部门和行业。但我国很多超采区是农业超采区，农业用水要结合城乡水权转换以及城市污水处理和回用等，逐步增加可供水量，压缩优质的地下水开采量。

④ 节水工程　针对地下水开采区的主要用户，开展节水工作，建设节水型社会、节水性工业和节水性农业。压缩水资源的需求量。针对地下水超采区用水效率和节水潜力，考虑地下水压采需要进行的节水工程建设，纳入当地节水规划中。

⑤ 其他水源工程　除污水处理和回用外，海水、微咸水等劣质水的综合利用也可以作为压采的替代水源，其他水源工程纳入当地供水工程规划中。

⑥ 地下水人工回灌工程　除了压缩地下水开采、替换地下水水源外，在适当的地区以适当的形式开展地下水的人工回灌工程建设。

地下水人工回灌主要有地表回灌和地下井灌两类。地表回灌还可以进一步按照回灌场所进行划分，例如渗坑、渗塘、灌补结合、河（渠）道渗露等形式，一般适用于包气带渗透性好的潜水分布区。井灌一般适用于深层地下水的回补。

8.5.2　地下水水源地保护

地下水是我国城乡居民宝贵的饮用水水源。保护好地下水水源地对于保障城乡居民的身体健康具有重要意义。

地下水水源地的保护包括城市集中式生活饮用水供水水源地和农村分散式生活供水水源地。

8.5.2.1　城市集中供水水源地的保护

(1) 水源地保护区的划分

根据地下水类型、埋深、承压状况、开采规模以及水源地傍河和非傍河等因素，进行地下水饮用水水源地分类。根据含水层空隙性质可分为孔隙水、裂隙和岩溶水；根据地下水埋深和承压状况可分为浅层水（包括潜水和弱承压水）和深层承压水；根据开采量大小可将浅层水分为小型、中型和大型。按水源地与河流所处地理位置，可将大型的分为傍河和非傍河型。

水源地范围的划分按照一级保护区、二级保护区等，具体可参见《饮用水水源保护区划分技术规范》（HJ/T 338—2007）中的有关要求。

(2) 保护和治理措施

水源地保护工程是在饮用水水源保护区建立隔离防护、综合整治、修复保护体系。

隔离防护是指通过在保护区边界设立物理或生物隔离设施，防止人类活动等对水源地保护和管理的干扰，拦截污染物直接进入水源保护区。

综合整治是指通过对保护区内现有点源、面源、内源、线源等各类污染源采取综合治理措施，对直接进入保护区的污染源采取分流、截污及入河、入渗控制等工程措施，阻隔污染物直接进入水源地水体。

修复保护是指通过采取生物和生态工程技术，对湖库型水源保护区的湖库周边湿地、环库岸生态和植被进行修复和保护，营造水源地良性生态系统。

鉴于修复保护工程是新兴的技术方法，发展较快，各城市在采用此类工程措施时，应根据水源地的具体特点，选择生物和生态工程技术，也可借鉴其他有实用基础的生态修复措施，以达到保护水源地的目的。

8.5.2.2　农村分散式供水水源地的保护

随着我国农村社会经济的快速发展，农村供水也不断改进，目前也逐步开始建设小区集中供水系统。但由于处理能力和技术等方面的原因，农村地区的供水主要受天然水质好坏的影响，因此，重在保护水源。

① 卫生安全　农村分散式供水井周边应禁止垃圾、粪便堆放和畜禽活动。一般地，在井和垃圾堆或者厕所的距离不应小于50m，并尽可能保持井在垃圾场上游方向。

② 井口　注意井口封闭性。井台口应高出地面50cm以上，避免雨季地表受污染水流的流入。对于洪泛区的农村地区，不仅要提高井口高度，还要有井口密封装置，避免洪水导致井水和地下水的污染。

8.5.3　地下水污染预防

地下水不同于地表水，一旦受到污染，依靠自身的自净能力很难恢复。因此，地下水的水质保护要优先从预防着手。地下水的有效预防离不开对地下水污染机理

的科学认识，在科学认识地下水污染机理基础上，进行地下水污染预防的有关措施制定和实施，地下水污染预防的主要措施包括保护区划、污染源治理、监测和预警等。地下水一旦污染，治理起来绝非易事。这是因为污染物不仅会污染地下水体，还会被含水介质（砂、黏土）吸附。

① 加强防治地下水污染的宣传、教育，让社会公众和各级政府了解地下水污染的危害性和防治的重要性。

② 制定完善的地下水污染防治法律法规。通过法律控制土壤和地下水污染是非常必要的，尤其在工业化国家中，这种必要性尤为显著。这一点可以参照发达国家的做法。在美国、欧洲一些发达国家，土地利用变更之前，必须进行所在区的土壤和地下水污染评价。只有符合规定质量标准的才可进行土地转让和项目建设。这种做法可以约束企业的污染行为，培养其保护环境的自觉性。

③ 尽快查明全国地下水污染状况，制定和实施地下水污染防治规划，切实保护地下水资源。

④ 解决污染物排放无序问题，做到先处理再排放。由于地下水污染治理难度大、时间长、费用高，因此保护地下水免受污染最有效的办法就是切断污染源。城市主要的污染源是废水、废液和垃圾。在发达国家，这些都是经过处理后再排放的。而在我国，不少城市依旧直接排放、填埋，对地下水构成严重威胁。

⑤ 尽快建立全国地下水污染监测网络和信息系统，实现对重要饮用地下水源水质的实时监控；应加强地下水污染机理和防治技术的攻关，建立一批土壤和地下水污染防治示范工程，为今后大规模实施地下水污染防治提供技术方法和积累经验。

8.5.4 地下水人工补给

地下水人工补给也称为地下水人工回灌补源或简称为回灌补源。无论是浅层地下水，深层承压水，其补给来源基本上都是有赖于地面水的入渗。渗入地下的水，在地层的空隙、裂缝中运动，并聚集起来，形成地下含水层。那么，如果借助于工程措施，人为地引导汛期洪水、排水及河道弃水，使其入渗地下，促使更多的地表水转化为地下水，则既可以增加地下水储量，同时减轻地表防洪压力。这就是所谓的人工补给地下水，简称人工回灌或人工引渗。

8.5.4.1 地下水人工补给的任务

地下水人工补给的任务，不仅限于增加水量。我国北方地区的气候特点是西北干旱少雨，华北春旱秋涝，降雨在季节上分布不均，作物需要水时很少降雨，不需要水时雨水过多，常常出现旱涝交替的局面。而旱涝碱的关键是水在起作用，水常常表现为时多时少。而人工补给地下水就是从时间和空间上合理地调节这种多水、少水的矛盾，尽可能地将水量分布不均匀的现象变成合理的分布，以尽其用，使水资源更好地满足各种需求。为了达到这个目的，就是要通过建立地下水库，调蓄地

表水、降水，综合利用水资源。地表水多时，将水储存于地下，使水资源不至于大量白白流走，同时减轻排洪、排涝的压力：地表水少时可利用较多的地下水抗旱。这样就可以严格有效地控制地下水位，解决旱、涝、碱的主要矛盾。这就是人工补给地下水的基本任务。

8.5.4.2 地下水人工补给的类型

（1）地面渗水补给

人为在地面放水，使水渗过包气带流入含水层里。其适用条件为：地表具有透水层，如砂土、亚砂土、砾石卵石等；包气带厚度以 10～20m 为宜；若地下不深处有隔水层，则应挖掘浅井或渠道，破坏隔水层，把水直接补给到含水层里。

地面渗水补给方法包括水盆地渗水、水库渗水、渠道渗水、农田灌溉渗水以及扩大河流底面积渗水等。

① 淹没或灌溉渗水补给　在平坦的地面上均匀地淹上一层薄水，使水不致扰动土壤，以缓慢的速度渗水，或者在灌溉区域农闲时用灌溉的方法让更多的水渗入地下补给地下水。

② 水盆地渗水补给　水盆地渗水补给包括水库渗漏，注地、池塘渗漏补给。

③ 渠道渗水补给　利用渠道渗水，渠底应挖掉耕作土，铺垫砂石，定期放水渗漏补给地下水。为了保持渠底的渗透性，应经常清除渠底的杂物和淤泥。

④ 河流渗水补给　河流入渗补给在我国干旱和半干旱地区应用比较广泛。渗水使大部分流失的水渗入地下保存起来，在需水季节可以加以利用。同时也能控制洪水，减少雨季洪水的灾害和土壤流失。为了增加河流的渗水量，可以扩大河流的水面和延长蓄水的时间。其方法有：在天然河流上修建拦河坝，开挖河岸、在河滩上开挖浅井，在雨季或洪水季节使洪水缓慢流失等等。还可以垂直河岸挖掘洞井（长达百米或千米），洪水季节河水流入洞井，可使离河较远的地方也得到河水的渗入补给。

（2）激发补给

诱导补给是一种间接的人工补给地下水的方法。在河流或其他地表水体（如渠道、池塘和湖泊等）附近凿井，抽汲地下水，使地下水位降低，增大地表水和地下水之间的水头差，诱导地表水大量渗入。此方法一般在砂、卵石地层效果较好。位于河流沿岸的工厂如果直接引用河水，若河水混浊，含泥沙量大，过滤澄清需要建很大的工程。但若河床是冲积的砂、卵石组成的，与地下水有密切的水力联系，则在河边开凿几口浅井，大量汲取地下水，就能诱导河水大量渗入补给地下水，并且因砂、卵石层的天然过滤而使浊水变清。

（3）注水补给

注水补给是利用管井、大口径井、竖井和坑道灌水注入地下，补给地下水。管井回灌是常用的注水补给方法，由于深度一般较大，可以用来补给承压水层或埋藏较深的潜水含水层。

参 考 文 献

[1] 周维博，施垌林，杨路华．地下水利用［M］．北京：中国水利水电出版社，2007.

[2] 朱学愚，钱孝星．地下水水文学［M］．北京：中国环境科学出版社，2005.

[3] 李广贺．水资源利用与保护［M］．北京：中国建筑工业出版社，2010.

[4] 汪志农．灌溉排水工程学［M］．北京：中国农业出版社，2005.

[5] 李砚阁．地下水库建设研究［M］．北京：中国环境科学出版社，2007.

[6] 曹万金．地下水资源建设与评价［M］．北京：水利电力出版社，1987.

[7] 水利部水资源司，南京水利科学研究院．21世纪初期中国地下水资源开发利用［M］．北京：中国水利水电出版社，2004.

[8] 张蔚榛，沈荣开．地下水文与地下水调控［M］．北京：中国水利水电出版社，1998.